IEC 61869-2

Edition 1.0 2012-09

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Instrument transformers –
Part 2: Additional requirements for current transformers

Transformateurs de mesure –
Partie 2: Exigences supplémentaires concernant les transformateurs de courant

IEC 61869-2:2012

THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2012 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester.
If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de la CEI ou du Comité national de la CEI du pays du demandeur.
Si vous avez des questions sur le copyright de la CEI ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de la CEI de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembé
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch

About the IEC

The International Electrotechnical Commission (IEC) is the leading global organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies.

About IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a corrigenda or an amendment might have been published.

Useful links:

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

The advanced search enables you to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,…).
It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details all new publications released. Available on-line and also once a month by email.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing more than 30 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) on-line.

Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre: csc@iec.ch.

A propos de la CEI

La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des Normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

A propos des publications CEI

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

Liens utiles:

Recherche de publications CEI - www.iec.ch/searchpub

La recherche avancée vous permet de trouver des publications CEI en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,…).
Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

Just Published CEI - webstore.iec.ch/justpublished

Restez informé sur les nouvelles publications de la CEI. Just Published détaille les nouvelles publications parues. Disponible en ligne et aussi une fois par mois par email.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne au monde de termes électroniques et électriques. Il contient plus de 30 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans les langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) en ligne.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: csc@iec.ch.

IEC 61869-2

Edition 1.0 2012-09

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE

Instrument transformers –
Part 2: Additional requirements for current transformers

Transformateurs de mesure –
Partie 2: Exigences supplémentaires concernant les transformateurs de courant

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

PRICE CODE
CODE PRIX XB

ICS 17.220.20

ISBN 978-2-83220-293-7

Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.
Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.

® Registered trademark of the International Electrotechnical Commission

CONTENTS

FOREWORD 5
1 Scope 8
2 Normative references 8
3 Terms and definitions 8
3.1 General definitions 8
3.3 Definitions related to current ratings 9
3.4 Definitions related to accuracy 10
3.7 Index of abbreviations 18
5 Ratings 20
5.3 Rated insulation levels 20
5.3.2 Rated primary terminal insulation level 20
5.3.5 Insulation requirements for secondary terminals 20
5.3.201 Inter-turn insulation requirements 20
5.5 Rated output 20
5.5.201 Rated output values 20
5.5.202 Rated resistive burden values 20
5.6 Rated accuracy class 21
5.6.201 Measuring current transformers 21
5.6.202 Protective current transformers 22
5.6.203 Class assignments for selectable-ratio current transformers 26
5.201 Standard values for rated primary current 26
5.202 Standard values for rated secondary current 27
5.203 Standard values for rated continuous thermal current 27
5.204 Short-time current ratings 27
5.204.1 Rated short-time thermal current (I_{th}) 27
5.204.2 Rated dynamic current (I_{dyn}) 27
6 Design and construction 27
6.4 Requirements for temperature rise of parts and components 27
6.4.1 General 27
6.13 Markings 27
6.13.201 Terminal markings 27
6.13.202 Rating plate markings 28
7 Tests 30
7.1 General 30
7.1.2 Lists of tests 30
7.2 Type tests 31
7.2.2 Temperature-rise test 31
7.2.3 Impulse voltage withstand test on primary terminals 33
7.2.6 Tests for accuracy 33
7.2.201 Short-time current tests 35
7.3 Routine tests 36
7.3.1 Power-frequency voltage withstand tests on primary terminals 36
7.3.5 Tests for accuracy 36
7.3.201 Determination of the secondary winding resistance (R_{ct}) 38
7.3.202 Determination of the secondary loop time constant (T_s) 38

7.3.203 Test for rated knee point e.m.f. (E_k) and exciting current at E_k 39
7.3.204 Inter-turn overvoltage test 39
7.4 Special tests 40
7.4.3 Measurement of capacitance and dielectric dissipation factor 40
7.4.6 Internal arc fault test 40
7.5 Sample tests 41
7.5.1 Determination of the remanence factor 41
7.5.2 Determination of the instrument security factor (FS) of measuring current transformers 41
Annex 2A (normative) Protective current transformers classes P, PR 42
Annex 2B (normative) Protective current transformer classes for transient performance 47
Annex 2C (normative) Proof of low-leakage reactance type 63
Annex 2D (informative) Technique used in temperature rise test of oil-immersed transformers to determine the thermal constant by an experimental estimation 64
Annex 2E (informative) Alternative measurement of the ratio error (ε) 66
Annex 2F (normative) Determination of the turns ratio error 68

Figure 201 – Duty cycles 15
Figure 202 – Primary time constant T_P 16
Figure 203 – Secondary linked flux for different fault inception angles γ 17
Figure 2A.1 – Vector Diagram 42
Figure 2A.2 – Error triangle 43
Figure 2A.3 – Typical current waveforms 44
Figure 2A.4 – Basic circuit for 1:1 current transformer 44
Figure 2A.5 – Basic circuit for current transformer with any ratio 45
Figure 2A.6 – Alternative test circuit 45
Figure 2B.1 – Short-circuit current for two different fault inception angles 48
Figure 2B.2 – $\psi_{max}(t)$ as the curve of the highest flux values, considering all relevant fault inception angles γ 48
Figure 2B.3 – Relevant time ranges for calculation of transient factor 49
Figure 2B.4 – Determination of K_{tf} in time range 1 at 50 Hz for T_s = 1,8 s 50
Figure 2B.5 – Determination of K_{tf} in time range 1 at 60 Hz for T_s = 1,5 s 50
Figure 2B.6 – Determination of K_{tf} in time range 1 at 16,7 Hz for T_s = 5.5 s 50
Figure 2B.7 – Limiting the magnetic flux by considering core saturation 52
Figure 2B.8 – Basic circuit 53
Figure 2B.9 – Determination of remanence factor by hysteresis loop 55
Figure 2B.10 – Circuit for d.c. method 56
Figure 2B.11 – Time-amplitude and flux-current diagrams 56
Figure 2B.12 – Recordings with shifted flux base line 57
Figure 2B.13 – Circuit for capacitor discharge method 58
Figure 2B.14 – Typical records for capacitor discharge method 59
Figure 2B.15 – Measurement of error currents 60
Figure 2D.1 – Graphical extrapolation to ultimate temperature rise 65
Figure 2E.1 – Simplified equivalent circuit of the current transformer 66

Table 201 – Limits of ratio error and phase displacement for measuring current transformers (classes 0,1 to 1) 21
Table 202 – Limits of ratio error and phase displacement for measuring current transformers (classes 0,2S and 0,5S) 22
Table 203 – Limits of ratio error for measuring current transformers (classes 3 and 5) 22
Table 204 – Characterisation of protective classes 23
Table 205 – Error limits for protective current transformers class P and PR 23
Table 206 – Error limits for TPX, TPY and TPZ current transformers 25
Table 207 – Specification Methods for TPX, TPY and TPZ current transformers 26
Table 208 – Marking of terminals 28
Table 10 – List of tests 31

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

INSTRUMENT TRANSFORMERS –

Part 2: Additional requirements for current transformers

FOREWORD

1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as closely as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

This International Standard IEC 61869-2 Ed.1.0 has been prepared by committee 38: Instrument transformers.

This first edition of IEC 61869-2 cancels and replaces the first edition of IEC 60044-1, published in 1996, and its Amendment 1 (2000) and Amendment 2 (2002), and the first edition of IEC 60044-6, published in 1992. Additionally it introduces technical innovations in the standardization and adaptation of the requirements for current transformers for transient performance.

The text of this standard is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
38/435/FDIS	38/437/RVD

Full information on the voting for the approval of this standard can be found in the report on voting indicated in the above table.

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

A list of all the parts in the IEC 61869 series, published under the general title *Instrument transformers*, can be found on the IEC website.

This Part 2 is to be used in conjunction with, and is based on, IEC 61869-1:2007, *General Requirements* – however the reader is encouraged to use its most recent edition.

This Part 2 follows the structure of IEC 61869-1:2007 and supplements or modifies its corresponding clauses.

When a particular clause/subclause of Part 1 is not mentioned in this Part 2, that clause/subclause applies as far as is reasonable. When this standard states “addition”, “modification” or “replacement”, the relevant text in Part 1 is to be adapted accordingly.

For additional clauses, subclauses, figures, tables, annexes or notes, the following numbering system is used:

– clauses, subclauses, tables, figures and notes that are numbered starting from 201 are additional to those in Part 1;
– additional annexes are lettered 2A, 2B, etc.

An overview of the planned set of standards at the date of publication of this document is given below. The updated list of standards issued by IEC TC38 is available at the website: www.iec.ch.

PRODUCT FAMILY STANDARDS		PRODUCT STANDARD	PRODUCTS	OLD STANDARD
		61869-2	ADDITIONAL REQUIREMENTS FOR CURRENT TRANSFORMERS	60044-1 60044-6
		61869-3	ADDITIONAL REQUIREMENTS FOR INDUCTIVE VOLTAGE TRANSFORMERS	60044-2
		61869-4	ADDITIONAL REQUIREMENTS FOR COMBINED TRANSFORMERS	60044-3
		61869-5	ADDITIONAL REQUIREMENTS FOR CAPACITIVE VOLTAGE TRANSFORMERS	60044-5
61869-1:2007 GENERAL REQUIREMENTS FOR INSTRUMENT TRANSFORMERS	**61869-6** ADDITIONAL GENERAL REQUIREMENT FOR ELECTRONIC INSTRUMENT TRANSFORMERS AND LOW POWER STAND ALONE SENSORS	**61869-7**	ADDITIONAL REQUIREMENTS FOR ELECTRONIC VOLTAGE TRANSFORMERS	60044-7
		61869-8	ADDITIONAL REQUIREMENTS FOR ELECTRONIC CURRENT TRANSFORMERS	60044-8
		61869-9	DIGITAL INTERFACE FOR INSTRUMENT TRANSFORMERS	
		61869-10	ADDITIONAL REQUIREMENTS FOR LOW-POWER STAND-ALONE CURRENT SENSORS	
		61869-11	ADDITIONAL REQUIREMENTS FOR LOW POWER STAND ALONE VOLTAGE SENSOR	60044-7
		61869-12	ADDITIONAL REQUIREMENTS FOR COMBINED ELECTRONIC INSTRUMENT TRANSFORMER OR COMBINED STAND ALONE SENSORS	
		61869-13	STAND ALONE MERGING UNIT	

Since the publication of IEC 60044-6 (*Requirements for protective current transformers for transient performance*) in 1992, the area of application of this kind of current transformers has been extended. As a consequence, the theoretical background for the dimensioning according to the electrical requirements has become much more complex. In order to keep this standard as user-friendly as possible, the explanation of the background information will be transferred to the Technical Report IEC 61869-100 TR, which is now in preparation.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC web site under "http://webstore.iec.ch" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

INSTRUMENT TRANSFORMERS –

Part 2: Additional requirements for Current Transformers

1 Scope

This part of IEC 61869 is applicable to newly manufactured inductive current transformers for use with electrical measuring instruments and/or electrical protective devices having rated frequencies from 15 Hz to 100 Hz.

2 Normative references

Clause 2 of IEC 61869-1:2007 is applicable with the following additions:

IEC 61869-1:2007, *Instrument Transformers – Part 1: General requirements*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions in IEC 61869-1:2007 apply with the following additions:

3.1 General definitions

3.1.201
current transformer
instrument transformer in which the secondary current, under normal conditions of use, is substantially proportional to the primary current and differs in phase from it by an angle which is approximately zero for an appropriate direction of the connections

[SOURCE: IEC 60050-321:1986, 321-02-01]

3.1.202
measuring current transformer
current transformer intended to transmit an information signal to measuring instruments and meters

[SOURCE: IEC 60050-321:1986, 321-02-18]

3.1.203
protective current transformer
a current transformer intended to transmit an information signal to protective and control devices

[SOURCE: IEC 60050-321: 1986, 321-02-19)

3.1.204
class P protective current transformer
protective current transformer without remanent flux limit, for which the saturation behaviour in the case of a symmetrical short-circuit is specified

3.1.205
class PR protective current transformer
protective current transformer with remanent flux limit, for which the saturation behaviour in the case of a symmetrical short-circuit is specified

3.1.206
class PX protective current transformer
protective current transformer of low-leakage reactance without remanent flux limit for which knowledge of the excitation characteristic and of the secondary winding resistance, secondary burden resistance and turns ratio, is sufficient to assess its performance in relation to the protective relay system with which it is to be used

3.1.207
class PXR protective current transformer
protective current transformer with remanent flux limit for which knowledge of the excitation characteristic and of the secondary winding resistance, secondary burden resistance and turns ratio, is sufficient to assess its performance in relation to the protective relay system with which it is to be used

Note 1 to entry: An increasingly number of situations occur where low DC currents are continuously flowing through current transformers. Therefore, in order to stop the current transformer from saturating, current transformers with air gaps, but with the same performance as Class PX, are used.

Note 2 to entry: The air gaps for remanence reduction do not necessarily lead to a high-leakage reactance current transformer (see Annex 2C).

3.1.208
class TPX protective current transformer for transient performance
protective current transformer without remanent flux limit, for which the saturation behaviour in case of a transient short-circuit current is specified by the peak value of the instantaneous error

3.1.209
class TPY protective current transformer for transient performance
protective current transformer with remanent flux limit, for which the saturation behaviour in case of a transient short-circuit current is specified by the peak value of the instantaneous error

3.1.210
class TPZ protective current transformer for transient performance
protective current transformer with a specified secondary time-constant, for which the saturation behaviour in case of a transient short-circuit current is specified by the peak value of the alternating error component

3.1.211
selectable-ratio current transformer
current transformer on which several transformation ratios are obtained by reconnecting the primary winding sections and / or by means of taps on the secondary winding

3.3 Definitions related to current ratings

3.3.201
rated primary current
I_{pr}
value of the primary current on which the performance of the transformer is based

[SOURCE: IEC 60050-321:1986, 321-01-11, modified title, synonym and definition]

3.3.202
rated secondary current
I_{sr}
value of the secondary current on which the performance of the transformer is based

[SOURCE: IEC 60050-321:1986, 321-01-15, modified title, synonym and definition]

--`,,```,,,,````-`-`,,`,,`,`,,`---

3.3.203
rated short-time thermal current
I_{th}
maximum value of the primary current which a transformer will withstand for a specified short time without suffering harmful effects, the secondary winding being short-circuited

[SOURCE: IEC 60050-321:1986, 321-02-22]

3.3.204
rated dynamic current
I_{dyn}
maximum peak value of the primary current which a transformer will withstand, without being damaged electrically or mechanically by the resulting electromagnetic forces, the secondary winding being short-circuited

[SOURCE: IEC 60050-321:1986, 321-02-24]

3.3.205
rated continuous thermal current
I_{cth}
value of the current which can be permitted to flow continuously in the primary winding, the secondary winding being connected to the rated burden, without the temperature rise exceeding the values specified

[SOURCE: IEC 60050-321:1986, 321-02-25]

3.3.206
rated primary short-circuit current
I_{psc}
r.m.s. value of the a.c. component of a transient primary short-circuit current on which the accuracy performance of a current transformer is based

Note 1 to entry: While I_{th} is related to the thermal limit, I_{psc} is related to the accuracy limit. Usually, I_{psc} is smaller than I_{th}.

3.3.207
exciting current
I_e
r.m.s. value of the current taken by the secondary winding of a current transformer, when a sinusoidal voltage of rated frequency is applied to the secondary terminals, the primary and any other windings being open-circuited

[SOURCE: IEC 60050-321:1986, 321-02-32]

3.4 Definitions related to accuracy

3.4.3
ratio error
ε
Definition 3.4.3 of IEC 61869-1:2007 is applicable with the addition of the following note:

Note 201 to entry: The current ratio error, expressed in per cent, is given by the formula:

$$\varepsilon = \frac{k_r I_s - I_p}{I_p} \times 100\ \%$$

where

k_r is the rated transformation ratio;
I_p is the actual primary current;
I_s is the actual secondary current when I_p is flowing, under the conditions of measurement.
An explicative vector diagram is given in 2A.1.

3.4.4
phase displacement
Δφ
The definition 3.4.4 of IEC 61869-1:2007 is applicable with the addition of the following note:

Note 1 to entry: An explicative vector diagram is given in 2A.1.

3.4.201
rated resistive burden
R_b
rated value of the secondary connected resistive burden in ohms

3.4.202
secondary winding resistance
R_{ct}
actual secondary winding d.c. resistance in ohms corrected to 75 ºC or such other temperature as may be specified

Note 1 to entry: R_{ct} is an actual value. It shall not be confused with the upper limit for R_{ct}, which can be specified otherwise.

3.4.203
composite error
ε_c
under steady-state conditions, the r.m.s. value of the difference between

a) the instantaneous values of the primary current, and
b) the instantaneous values of the actual secondary current multiplied by the rated transformation ratio,

the positive signs of the primary and secondary currents corresponding to the convention for terminal markings

Note 1 to entry: The composite error ε_c is generally expressed as a percentage of the r.m.s. values of the primary current:

$$\varepsilon_c = \frac{\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T (k_r i_s - i_p)^2 \, dt}}{I_p} \times 100\ \%$$

where

k_r is the rated transformation ratio;
I_p is the r.m.s. value of the primary current;
i_p is the instantaneous value of the primary current;
i_s is the instantaneous value of the secondary current;
T is the duration of one cycle.

For further explanation, refer to 2A.4.

[SOURCE: IEC 60050-321:1986, 321-02-26, modified note to entry]

3.4.204
rated instrument limit primary current
I_{PL}
value of the minimum primary current at which the composite error of the measuring current transformer is equal to or greater than 10 %, the secondary burden being equal to the rated burden

[SOURCE: IEC 60050-321:1986, 321-02-27]

3.4.205
instrument security factor
FS
ratio of rated instrument limit primary current to the rated primary current

Note 1 to entry: Attention should be paid to the fact that the actual instrument security factor is affected by the burden. When the burden value is significantly lower than rated one, larger current values will be produced on the secondary side in the case of short-circuit current.

Note 2 to entry: In the event of system fault currents flowing through the primary winding of a current transformer, the safety of the apparatus supplied by the transformer is at its highest when the value of the rated instrument security factor (FS) is at its lowest.

[SOURCE: IEC 60050-321:1986, 321-02-28, modified notes to entry]

3.4.206
secondary limiting e.m.f. for measuring current transformers
E_{FS}
product of the instrument security factor FS, the rated secondary current and the vectorial sum of the rated burden and the impedance of the secondary winding

Note 1 to entry: The secondary limiting e.m.f. for measuring current transformers E_{FS} is calculated as

$$E_{FS} = FS \times I_{sr} \times \sqrt{(R_{ct} + R_b)^2 + X_b^2}$$

where: R_b is the resistive part of the rated burden;

X_b is the inductive part of the rated burden.

This method will give a higher value than the actual one. It was chosen in order to apply the same test method as used for protective current transformers. Refer to 7.2.6.202 and 7.2.6.203.

[SOURCE: IEC 60050-321:1986, 321-02-31, modified title, synonym and note to entry]

3.4.207
rated accuracy limit primary current
value of primary current up to which the current transformer will comply with the requirements for composite error

[SOURCE: IEC 60050-321:1986, 321-02-29]

3.4.208
accuracy limit factor
ALF
ratio of the rated accuracy limit primary current to the rated primary current

[SOURCE: IEC 60050-321:1986, 321-02-30]

3.4.209
secondary limiting e.m.f. for protective current transformers
E_{ALF}
product of the accuracy limit factor, the rated secondary current and the vectorial sum of the rated burden and the impedance of the secondary winding

Note 1 to entry: The secondary limiting e.m.f for class P and PR protective current transformers E_{ALF} is calculated as

$$E_{ALF} = ALF \times I_{sr} \times \sqrt{(R_{ct} + R_b)^2 + X_b^2}$$

where: R_b is the resistive part of the rated burden;

X_b is the inductive part of the rated burden.

3.4.210
saturation flux
Ψ_{sat}
maximum value of secondary linked flux in a current transformer, which corresponds to the magnetic saturation of the core material

Note 1 to entry: The most suitable procedure for the determination of the saturation flux Ψ_{sat} is given with the d.c. saturation method described in 2B.2.3.

Note 2 to entry: In the former standard IEC 60044-6, Ψ_s was defined as a knee point value, which characterized the transition from the non-saturated to the fully saturated state of a core. This definition could not gain acceptance because the saturation value was too low, and led to misunderstandings and contradictions. Therefore, it was replaced by Ψ_{sat}, which defines the condition of complete saturation.

3.4.211
remanent flux
Ψ_r
value of secondary linked flux which would remain in the core 3 min after the interruption of a magnetizing current of sufficient magnitude to induce saturation flux (Ψ_{sat})

3.4.212
remanence factor
K_R
ratio of the remanent flux to the saturation flux, expressed as a percentage

3.4.213
secondary loop time constant
T_s
value of the time constant of the secondary loop of the current transformer obtained from the sum of the magnetizing and the leakage inductances (L_s) and the secondary loop resistance (R_s)

$$T_s = L_s / R_s$$

3.4.214
excitation characteristic
graphical or tabular presentation of the relationship between the r.m.s. value of the exciting current and a sinusoidal voltage applied to the secondary terminals of a current transformer, the primary and other windings being open-circuited, over a range of values sufficient to define the characteristics from low levels of excitation up to 1.1 times the knee point e.m.f.

3.4.215
knee point voltage
r.m.s. value of the sinusoidal voltage at rated frequency applied to the secondary terminals of the transformer, all other terminals being open-circuited, which, when increased by 10 %, causes the r.m.s. value of the exciting current to increase by 50 %

[SOURCE: IEC 60050-321:1986, 321-02-34]

3.4.216
knee point e.m.f.
e.m.f. of a current transformer at rated frequency, which, when increased by 10 %, causes the r.m.s. value of the exciting current to increase by 50 %

Note 1 to entry: While the knee point voltage can be applied to the secondary terminals of a current transformer, the knee point e.m.f. is not directly accessible. The values of the knee point voltage and of the knee point e.m.f. are deemed as equal, due to the minor influence of the voltage drop across the secondary winding resistance.

3.4.217
rated knee point e.m.f.
E_k
lower limit of the knee point e.m.f.

Note 1 to entry: The rated knee point e.m.f. appears in the specifications of class PX and PXR protective current transformers. It may be calculated as

$$E_k = K_x \times (R_{ct} + R_b) \times I_{sr}$$

3.4.218
rated turns ratio
specified ratio of the number of primary turns to the number of secondary turns

EXAMPLE 1 1/600 (meaning 1 primary turn to 600 secondary turns)

EXAMPLE 2 2/1200 (meaning 2 primary turns to 1200 secondary turns)

Note 1 to entry: The rated turns ratio appears in the specifications of class PX and PXR protective current transformers.

Note 2 to entry: Rated turns ratio and rated transformation ratio are both defined as primary to secondary entities. If they shall be compared, the value of the rated turns ratio has to be inverted.

3.4.219
turns ratio error
difference between the actual turns ratio and the rated turns ratio, expressed as a percentage of the rated turns ratio

3.4.220
dimensioning factor
K_x
factor to indicate the multiple of rated secondary current (I_{sr}) occurring under power system fault conditions, inclusive of safety margins, up to which the transformer is required to meet performance requirements

尺寸因数：在电力系统错误条件下，额定多变比二次电流包含安全余量，上至要求的参数

Note 1 to entry: See formula under 3.4.217.

3.4.221
instantaneous error current
i_ε
difference between the instantaneous values of the secondary current (i_s) multiplied by the rated transformation ratio (k_r) and the primary current (i_p):

$$i_\varepsilon = k_r \times i_s - i_p$$

Note 1 to entry: When both alternating current components (i_{sac} , i_{pac}) and direct current components (i_{sdc} , i_{pdc}) are present, the constituent components ($i_{\varepsilon ac}$, $i_{\varepsilon dc}$) are separately identified as follows:

$$i_\varepsilon = i_{\varepsilon ac} + i_{\varepsilon dc} = (k_r \times i_{sac} - i_{pac}) + (k_r \times i_{sdc} - i_{pdc})$$

3.4.222
peak instantaneous error
$\hat{\varepsilon}$
peak value ($\hat{i}_\varepsilon$) of instantaneous error current (see 3.4.221) for the specified duty cycle, expressed as a percentage of the peak value of the rated primary short-circuit current:

$$\hat{\varepsilon} = \frac{\hat{i}_\varepsilon}{\sqrt{2} \times I_{psc}} \times 100\%$$

3.4.223
peak alternating error component
$\hat{\varepsilon}_{ac}$

peak value $\hat{i}_{\varepsilon ac}$ of the alternating component of the instantaneous error current, expressed as a percentage of the peak value of the rated primary short-circuit current:

$$\hat{\varepsilon}_{ac} = \frac{\hat{i}_{\varepsilon ac}}{\sqrt{2} \times I_{psc}} \times 100\ \%$$

3.4.224
specified duty cycle (C-O and / or C-O-C-O)
duty cycle in which, during each specified energization, the primary short circuit current is assumed to have the worst-case inception angle (see Figure 201)

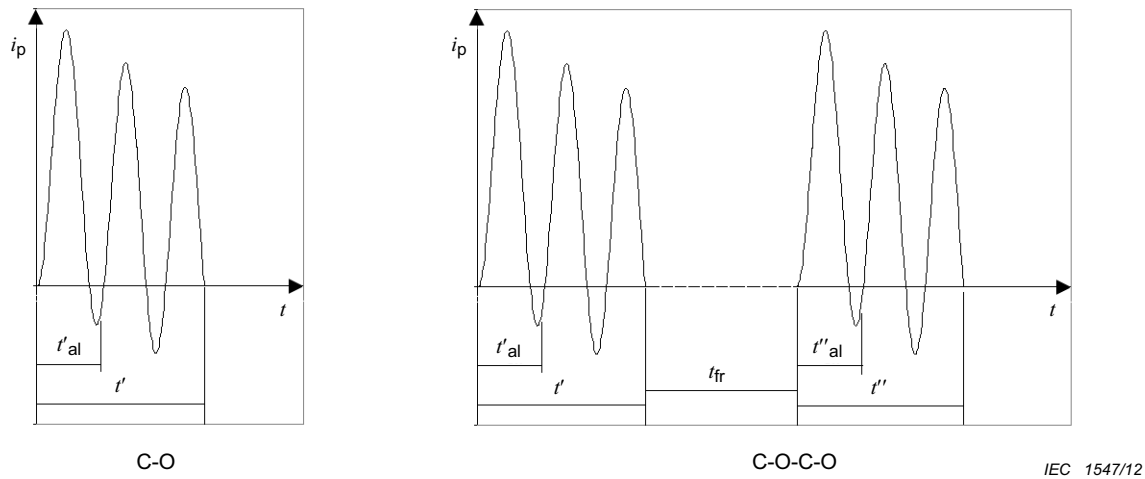


Figure 201 – Duty cycles

3.4.225
Specified primary time constant
T_P
that specified value of the time constant of the d.c. component of the primary short-circuit current on which the transient performance of the current transformer is based (see Figure 202)

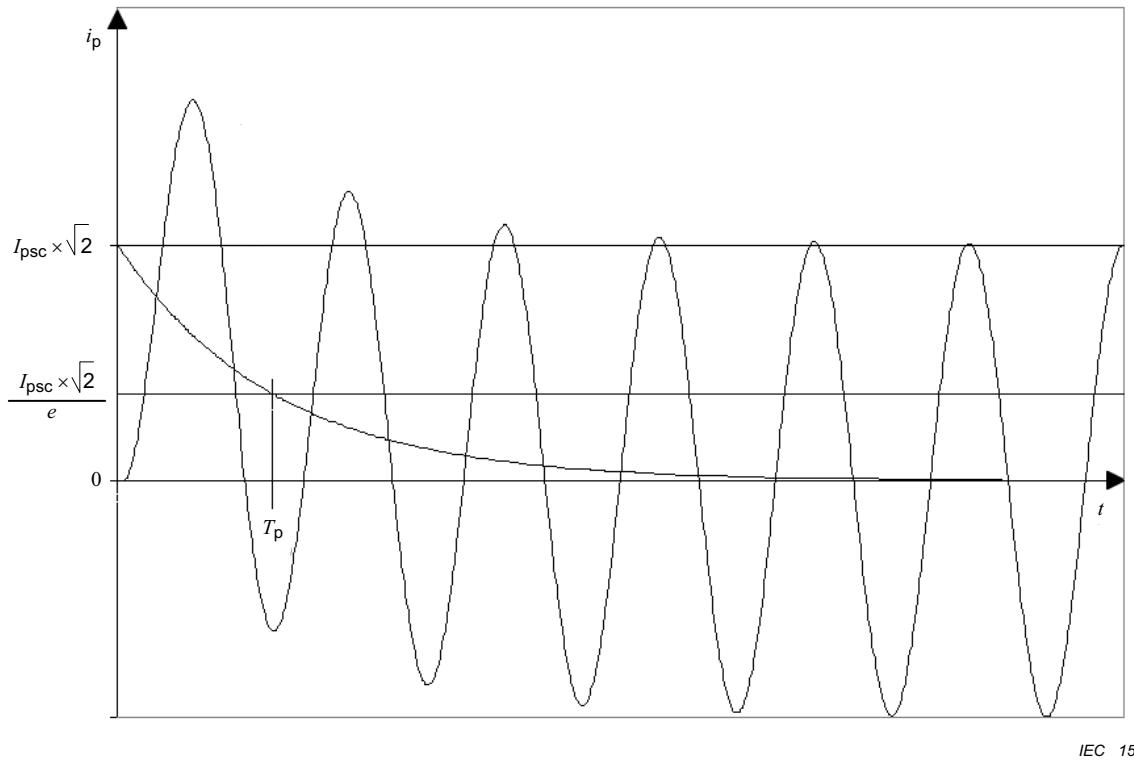


Figure 202 – Primary time constant T_P

3.4.226
duration of the first fault
t′
duration of the fault in a C-O duty cycle, or of the first fault in a C-O-C-O duty cycle

Note 1 to entry: See Figure 201.

3.4.227
duration of the second fault
t″
duration of the second fault in a C-O-C-O duty cycle

Note 1 to entry: See Figure 201.

3.4.228
specified time to accuracy limit in the first fault
t'_{al}
time in a C-O duty cycle, or in the first energization of a C-O-C-O duty cycle, during which the specified accuracy has to be maintained

Note 1 to entry: See Figure 201. This time interval is usually defined by the critical measuring time of the associated protection scheme.

3.4.229
specified time to accuracy limit in the second fault
t''_{al}
time in the second energization of a C-O-C-O duty cycle during which the specified accuracy has to be maintained

Note 1 to entry: See Figure 201. This time interval is usually defined by the critical measuring time of the associated protection scheme.

3.4.230
fault repetition time
t_{fr}
time interval between interruption and re-application of the primary short-circuit current during a circuit breaker auto-reclosing duty cycle in case of a non-successful fault clearance

Note 1 to entry: See Figure 201.

3.4.231
secondary loop resistance
R_s
total resistance of the secondary circuit

$$R_s = R_b + R_{ct}$$

3.4.232
rated symmetrical short-circuit current factor
K_{ssc}
ratio of the rated primary short circuit current to the rated primary current

$$K_{ssc} = \frac{I_{psc}}{I_{pr}}$$

3.4.233
transient factor
K_{tf}
ratio of the secondary linked flux at a specified point of time in a duty cycle to the peak value of its a.c. component

Note 1 to entry: K_{tf} is calculated analytically with different formulae depending on T_P, T_S, on the duty cycle and on the fault inception angle. A determination of K_{tf} is given in Annex 2B.1.

Note 2 to entry: Figure 203 shows possible courses of the secondary linked flux for different fault inception angles γ.

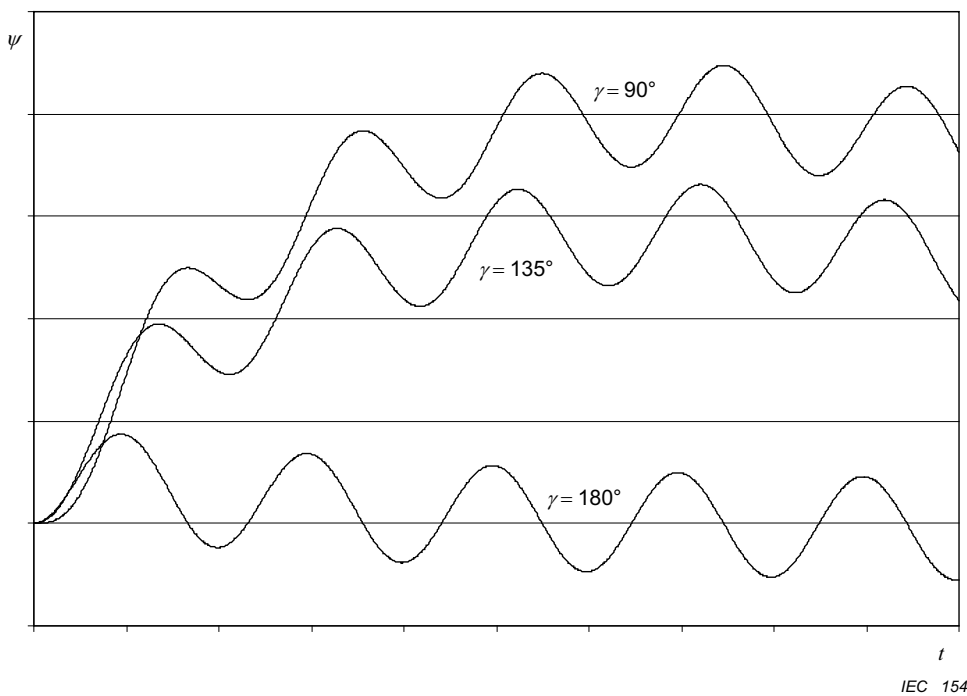


Figure 203 – Secondary linked flux for different fault inception angles γ

3.4.234
transient dimensioning factor
K_{td}
dimensioning factor to consider the increase of the secondary linked flux due to a d.c. component of the primary short circuit current

Note 1 to entry: While K_{tf} is defined as a function of time, K_{td} is the definitive dimensioning parameter. K_{td} is derived from current transformer requirements given by the relay manufacturer (gained from relay stability type tests) or from worst-case considerations based on the K_{tf} curves (see 2B.1).

3.4.235
Low-leakage reactance current transformer
current transformer for which measurements made at the secondary terminals (while primary open-circuited) are sufficient for an assessment of its protection performance up to the required accuracy limit

3.4.236
high-leakage reactance current transformer
current transformer which does not satisfy the requirements of 3.4.235, and for which an additional allowance is made by the manufacturer to take account of influencing effects which result in additional leakage flux

3.4.237
rated equivalent limiting secondary e.m.f.
E_{al}
that r.m.s. value of the equivalent secondary circuit e.m.f. at rated frequency necessary to meet the requirements of the specified duty cycle:

$$E_{al} = K_{ssc} \times K_{td} \times (R_{ct} + R_b) \times I_{sr}$$

3.4.238
peak value of the exciting secondary current at E_{al}
$\hat{I}_{al}$
peak value of the exciting current when a voltage corresponding to E_{al} is applied to the secondary terminals while the primary winding is open

3.4.239
factor of construction
F_c
factor reflecting the possible differences in measuring results at limiting conditions between direct test and indirect test methods

Note 1 to entry: The measuring procedure is given in 2B.3.3.

3.7 Index of abbreviations

3.7 of IEC 61869-1:2007 is replaced by the following table.

AIS	Air-Insulated Switchgear
ALF	Accuracy limit factor
CT	Current Transformer
CVT	Capacitive Voltage Transformer
E_{al}	rated equivalent limiting secondary e.m.f.
E_{ALF}	secondary limiting e.m.f. for class P and PR protective current transformers
E_{FS}	secondary limiting e.m.f for measuring current transformers
E_k	rated knee point e.m.f.

F	mechanical load
F_c	factor of construction
f_R	rated frequency
F_{rel}	relative leakage rate
FS	instrument security factor
GIS	Gas-Insulated Switchgear
$\hat{I}_{al}$	peak value of the exciting secondary current at E_{al}
I_{cth}	rated continuous thermal current
I_{dyn}	rated dynamic current
I_e	exciting current
I_{PL}	rated instrument limit primary current
I_{pr}	rated primary current
I_{psc}	rated primary short-circuit current
I_{sr}	rated secondary current
IT	Instrument Transformer
I_{th}	rated short-time thermal current
i_ε	instantaneous error current
k	actual transformation ratio
k_r	rated transformation ratio
K_R	remanence factor
K_{ssc}	rated symmetrical short-circuit current factor
K_{td}	transient dimensioning factor
K_{tf}	transient factor
K_x	dimensioning factor
L_m	magnetizing inductance
R_b	rated resistive burden
R_{ct}	secondary winding resistance
R_s	secondary loop resistance
S_r	rated output
t'	duration of the first fault
t''	duration of the second fault
t'_{al}	specified time to accuracy limit in the first fault
t''_{al}	specified time to accuracy limit in the second fault
t_{fr}	fault repetition time
T_p	specified primary time constant
T_s	secondary loop time constant
U_m	highest voltage for equipment
U_{sys}	highest voltage for system
VT	Voltage Transformer
$\Delta\varphi$	phase displacement
ε	ratio error

ε_c	composite error
$\hat{\varepsilon}$	peak value of instananeous error
$\hat{\varepsilon}_{ac}$	peak value of alternating error component
Ψ_r	remanent flux
Ψ_{sat}	saturation flux

5 Ratings

5.3 Rated insulation levels

5.3.2 Rated primary terminal insulation level

Clause 5.3.2 of IEC 61869-1:2007 is applicable with the addition of the following:

For a current transformer without primary winding and without primary insulation of its own, the value U_m = 0,72 kV is assumed.

5.3.5 Insulation requirements for secondary terminals

Clause 5.3.5 of IEC 61869-1:2007 is applicable with the addition of the following:

The secondary winding insulation of class PX and class PXR current transformers having a rated knee point e.m.f. $E_k \geq 2$ kV shall be capable of withstanding a rated power frequency withstand voltage of 5 kV r.m.s. for 60 s.

5.3.201 Inter-turn insulation requirements

The rated withstand voltage for inter-turn insulation shall be 4,5 kV peak.

For class PX and class PXR current transformers having a rated knee point e.m.f. of greater than 450 V, the rated withstand voltage for the inter-turn insulation shall be a peak voltage of 10 times the r.m.s. value of the specified knee point e.m.f., or 10 kV peak, whichever is the lower.

NOTE 1 Due to the test procedure, the wave shape can be highly distorted.

NOTE 2 In accordance with the test procedure 7.3.204, lower voltage values may result.

5.5 Rated output

5.5.201 Rated output values

The standard values of rated output for measuring classes, class P and class PR are:

2,5 – 5,0 – 10 – 15 and 30 VA.

Values above 30 VA may be selected to suit the application.

NOTE For a given transformer, provided one of the values of rated output is standard and associated with a standard accuracy class, the declaration of other rated outputs, which may be non-standard values, but associated with other standard accuracy classes, is not precluded.

5.5.202 Rated resistive burden values

Standard values for rated resistive burden in Ω for class TPX, TPY and TPZ current transformers are:

0,5 – 1 – 2 – 5 Ω

The preferred values are underlined. The values are based on a rated secondary current of 1 A. For current transformers having a rated secondary current other than 1 A, the above values shall be adjusted in inverse ratio to the square of the current.

NOTE For a given transformer, provided one of the values of rated resistive burden is standard and associated with a standard accuracy class, the declaration of other rated resistive burdens, which may be non-standard values, but associated with other standard accuracy classes, is not precluded.

5.6 Rated accuracy class

5.6.201 Measuring current transformers

5.6.201.1 Accuracy class designation for measuring current transformers

For measuring current transformers, the accuracy class is designated by the highest permissible percentage of the ratio error (ε) at rated primary current and rated output.

5.6.201.2 Standard accuracy classes

The standard accuracy classes for measuring current transformers are:

0,1 – 0,2 – 0,2S – 0,5 – 0,5S – 1 – 3 – 5

5.6.201.3 Limits of ratio error (ε) and phase displacement for measuring current transformers

For classes 0,1 – 0,2 – 0,5 and 1, the ratio error and phase displacement at rated frequency shall not exceed the values given in Table 201 where the burden can assume any value from 25 % to 100 % of the rated output.

For classes 0,2S and 0,5S the ratio error and phase displacement at the rated frequency shall not exceed the values given in Table 202 where the burden can assume any value from 25 % and 100 % of the rated output.

For class 3 and class 5, the ratio error at rated frequency shall not exceed the values given in Table 203 where the burden can assume any value from 50 % to 100 % of the rated output. There are no specified limits of phase displacement for class 3 and class 5.

For all classes, the burden shall have a power-factor of 0,8 lagging except that, when the burden is less than 5 VA, a power-factor of 1,0 shall be used, with a minimum value of 1 VA.

NOTE In general the prescribed limits of ratio error and phase displacement are valid for any given position of an external conductor spaced at a distance in air not less than that required for insulation in air at the highest voltage for equipment (U_m).

Table 201 – Limits of ratio error and phase displacement for measuring current transformers (classes 0,1 to 1)

Accuracy class	Ratio error				Phase displacement							
	± %				± Minutes				± Centiradians			
	at current (% of rated)				at current (% of rated)				at current (% of rated)			
	5	20	100	120	5	20	100	120	5	20	100	120
0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	15	8	5	5	0,45	0,24	0,15	0,15
0,2	0,75	0,35	0,2	0,2	30	15	10	10	0,9	0,45	0,3	0,3
0,5	1,5	0,75	0,5	0,5	90	45	30	30	2,7	1,35	0,9	0,9
1	3,0	1,5	1,0	1,0	180	90	60	60	5,4	2,7	1,8	1,8

Table 202 – Limits of ratio error and phase displacement for measuring current transformers (classes 0,2S and 0,5S)

Accuracy class	Ratio error					Phase displacement									
	± %					± Minutes					± Centiradians				
	at current (% of rated)					at current (% of rated)					at current (% of rated)				
	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120
0,2 S	0,75	0,35	0,2	0,2	0,2	30	15	10	10	10	0,9	0,45	0,3	0,3	0,3
0,5 S	1,5	0,75	0,5	0,5	0,5	90	45	30	30	30	2,7	1,35	0,9	0,9	0,9

Table 203 – Limits of ratio error for measuring current transformers (classes 3 and 5)

Class	Ratio error	
	± %	
	at current (% of rated)	
	50	120
3	3	3
5	5	5

5.6.201.4 Extended burden range

For all measuring classes, an extended burden range can be specified. The ratio error and phase displacement shall not exceed the limits of the appropriate class given in Table 201, Table 202 and Table 203 for the range of secondary burden from 1 VA up to rated output. The power factor shall be 1,0 over the full burden range. The maximum rated output is limited to 15 VA.

5.6.201.5 Extended current ratings

Current transformers of accuracy classes 0.1 to 1 may be marked as having an extended current rating provided they comply with the following two requirements:

a) the rated continuous thermal current shall be the rated extended primary current.

b) the limits of ratio error and phase displacement prescribed for 120 % of rated primary current in Table 201 shall be retained up to the rated extended primary current.

The rated extended primary current shall be expressed as a percentage of the rated primary current.

5.6.201.6 Instrument security factor

An instrument security factor may be specified.

Standard values are: FS 5 and FS 10

5.6.202 Protective current transformers

5.6.202.1 General

Three different approaches are designated to define protective current transformers (see Table 204). In practice, each of the three definitions may result in the same physical realization.

Table 204 – Characterisation of protective classes

Designation	Limit for remanent flux	Explanation
P	no [a]	Defining a current transformer to meet the composite error requirements of a short-circuit current under symmetrical steady state conditions
PR	yes	
PX	no [a, b]	Defining a current transformer by specifying its magnetizing characteristic
PXR	yes [b]	
TPX	no [a]	Defining a current transformer to meet the transient error requirements under the conditions of an asymmetrical short-circuit current
TPY	yes	
TPZ	yes	

[a] Although there is no limit of remanent flux, air gaps are allowed, e.g. in split core current transformers.

[b] To distinguish between PX and PXR, the remanent flux criteria is used.

5.6.202.2 Class P protective current transformers

5.6.202.2.1 Standard accuracy limit factors (ALF)

The standard ALF values are:

5 – 10 – 15 – 20 – 30

5.6.202.2.2 Accuracy class designation

The accuracy class is designated using the highest permissible percentage of the composite error, followed by the letter “P” (standing for “protection”) and the ALF value.

5.6.202.2.3 Standard accuracy classes

The standard accuracy classes for protective current transformers are:

5P and 10P

5.6.202.2.4 Error limits for class P protective current transformers

At rated frequency and with rated burden connected, the ratio error, phase displacement and composite error shall not exceed the limits given in Table 205.

The rated burden shall have a power-factor of 0,8 inductive except that, when the rated output is less than 5 VA a power-factor of 1,0 shall be used.

Table 205 – Error limits for protective current transformers class P and PR

Accuracy class	Ratio error at rated primary current	Phase displacement at rated primary current		Composite error at rated accuracy limit primary current
	± %	± Minutes	± Centiradians	%
5P and 5PR	1	60	1,8	5
10P and 10PR	3	–	–	10

5.6.202.3 Class PR protective current transformers

5.6.202.3.1 Standard accuracy limit factors (ALF)

The standard ALF values are:

5 – 10 – 15 – 20 – 30

5.6.202.3.2 Accuracy class designation

The accuracy class is designated by the highest permissible percentage of the composite error, followed by the letters "PR" (indicating protection low remanence) and the ALF value.

5.6.202.3.3 Standard accuracy classes

The standard accuracy classes for low remanence protective current transformers are:

5PR and 10PR

5.6.202.3.4 Error limits for class PR protective current transformers

At rated frequency and with rated burden connected, the ratio error, phase displacement and composite error shall not exceed the limits given in Table 205.

The rated burden shall have a power-factor of 0,8 inductive except that, when the rated output is less than 5 VA a power-factor of 1,0 shall be used.

5.6.202.3.5 Remanence factor (K_R)

The remanence factor (K_R) shall not exceed 10 %.

NOTE The insertion of one or more air gaps in the core is a method for limiting the remanence factor.

5.6.202.3.6 Secondary loop time constant (T_s)

The secondary loop time constant may be specified.

5.6.202.3.7 Secondary winding resistance (R_{ct})

The upper limit of the secondary winding resistance may be specified.

5.6.202.4 Class PX and class PXR protective current transformers

PX级保护绕组

The performance of class PX protective current transformers shall be specified in terms of the following:

- rated primary current (I_{pr}); 额定一次电流
- rated secondary current (I_{sr}); 额定二次电流
- rated turns ratio; 额定匝比
- rated knee point e.m.f. (E_k); 额定拐点电势和在其某一制定百分数下的最大励磁电流（Ie）
- upper limit of exciting current (I_e) at the rated knee point e.m.f. and/or at a stated percentage thereof; 在额定拐点电势和在其某一制定百分数下的最大励磁电流（Ie）
- upper limit of secondary winding resistance (R_{ct}). 二次绕组最大阻值

Instead of specifying the rated knee point e.m.f. (E_k) explicitly, E_k may be calculated as follows:

计算公式

$$E_k = K_x \times (R_{ct} + R_b) \times I_{sr}$$

In this case, the rated resistive burden (R_b) and the dimensioning factor (K_x) shall be specified, and the choice of R_{ct} is left to the manufacturer.

如果额定阻值负荷和计算系数应该给出 然后阻值留给制造商计算

For class PX, the turns ratio error shall not exceed ±0,25 %.

匝比误差不超过正负百分之0.25

For class PXR, the turns ratio error shall not exceed ±1 %.

For class PXR, the remanence factor shall not exceed 10 %.

NOTE 201 To ensure a remanence factor <= 10 %, class PXR current transformers may comprise air gaps.

NOTE 202 For large class PXR cores with low ampere-turns, it may be difficult to meet the remanence factor requirement. In such cases, a remanence factor higher than 10 % may be agreed.

5.6.202.5 Protective current transformers for transient performance

5.6.202.5.1 Error limits for TPX, TPY and TPZ current transformers

With rated resistive burden connected to the current transformer, the ratio error and the phase displacement at rated frequency shall not exceed the error limits given in Table 206.

When the specified duty cycle (or a duty cycle corresponding to the specified transient dimensioning factor K_{td}) is applied to the current transformer connected to the rated resistive burden, the transient errors $\hat{\varepsilon}$ (for TPX and TPY) or $\hat{\varepsilon}_{ac}$ (for TPZ) shall not exceed the limits given in Table 206.

All error limits are based on a secondary winding temperature of 75°C.

Table 206 – Error limits for TPX, TPY and TPZ current transformers

Class	At rated primary current			Transient error limits under specified duty cycle conditions
	Ratio error	Phase displacement		
	±%	Minutes	Centiradians	
TPX	0,5	±30	±0,9	$\hat{\varepsilon}$ =10 %
TPY	1,0	±60	±1,8	$\hat{\varepsilon}$ =10 %
TPZ	1,0	180±18	5,3±0,6	$\hat{\varepsilon}_{ac}$ =10 %

NOTE 1 In some cases, the absolute value of the phase displacement may be of less importance than achieving minimal deviation from the average value of a given production series.

NOTE 2 For TPY cores, the following formula can be used under the condition that the appropriate E_{al} value does not exceed the linear part of the magnetizing curve:

$$\hat{\varepsilon} = \frac{K_{td}}{2\pi f_R \times T_s} \times 100\,\%$$

5.6.202.5.2 Limits for remanence factor (K_R)

TPX: no limit

TPY: $K_R \leq 10\,\%$

TPZ: $K_R \leq 10\,\%$

NOTE For TPZ cores, a remanence factor << 10 % is given by the design. Therefore, the remanent flux can be neglected.

5.6.202.5.3 Specification Methods

The two specification methods are illustrated in Table 207.

In some cases, the choice of one specific duty cycle cannot describe all protection requirements. Therefore, the alternative definition offers the possibility to specify “overall requirements”, which cover the requirements of different duty cycles. The specifications shall not be mixed, otherwise the current transformer may be over-determined.

Table 207 – Specification Methods for TPX, TPY and TPZ current transformers

Standard specification	**Alternative specification**
Class designation (TPX, TPY or TPZ)	Class designation (TPX, TPY or TPZ)
Rated symmetrical short-circuit current factor K_{ssc}	Rated symmetrical short-circuit current factor K_{ssc}
Duty cycle, consisting of for C-O cycle: t'_{al} for C-O-C-O cycle: t'_{al}, t', t_{fr}, t''_{al}	Rated value of transient dimensioning factor K_{td} Rated value of secondary loop time constant T_S (for TPY cores only)
Rated primary time constant T_p	
Rated resistive burden R_b	Rated resistive burden R_b

NOTE 1 For current transformers with tapped secondary windings, the given accuracy requirements can be fulfilled for one ratio only.

Note 2 For current transformers with primary reconnection, the accuracy requirements may be fulfilled for different ratios. In this case, attention should be paid to the factor of construction F_c which may be influenced by the configuration of the primary conductors.

NOTE 3 In the alternative specification, K_{td} is usually given by the supplier of the protection devices. T_S has also to be specified, because it is the only parameter of the current transformer which is used in the calculation of K_{td}.

5.6.203 Class assignments for selectable-ratio current transformers

5.6.203.1 Accuracy performance for current transformers with primary reconnection

For all accuracy classes, the accuracy requirements refer to all specified reconnections.

5.6.203.2 Accuracy performance for current transformers with tapped secondary windings

For all accuracy classes, the accuracy requirements refer to the highest transformation ratio, unless specified otherwise.

When required by the purchaser, the manufacturer shall give information about the accuracy performance at lower ratios.

5.201 Standard values for rated primary current

The standard values for rated primary current are:

10 – 12,5 – 15 – 20 – 25 – 30 – 40 – 50 – 60 – 75 A,

and their decimal multiples or fractions.

The preferred values are those underlined.

5.202 Standard values for rated secondary current

The standard values for rated secondary current are 1 A and 5 A.

For protective current transformers for transient performance, the standard value of the rated secondary current is 1 A.

5.203 Standard values for rated continuous thermal current

The standard value for rated continuous thermal current is the rated primary current.

When a rated continuous thermal current greater than the rated primary current is specified, the preferred values are 120 %, 150 % and 200 % of rated primary current.

5.204 Short-time current ratings

5.204.1 Rated short-time thermal current (I_{th})

A rated short-time thermal current (I_{th}) shall be assigned to the transformer.

The standard value for the duration of the rated short-time thermal current is 1 s.

5.204.2 Rated dynamic current (I_{dyn})

The standard value of the rated dynamic current (I_{dyn}) is 2,5 times the rated short-time thermal current (I_{th}).

6 Design and construction

6.4 Requirements for temperature rise of parts and components

6.4.1 General

This clause of IEC 61869-1:2007 is applicable with the addition of the following:

The temperature rise in a current transformer when carrying a primary current equal to the rated continuous thermal current, with a unity power-factor burden corresponding to the rated output, shall not exceed the appropriate value given in Table 5 of IEC 61869-1:2007. These values are based on the service conditions given in Clause 4.

6.13 Markings

6.13.201 Terminal markings

6.13.201.1 General rules

The terminal markings shall identify:

a) the primary and secondary windings;

b) the winding sections, if any;

c) the relative polarities of windings and winding sections;

d) the intermediate taps, if any.

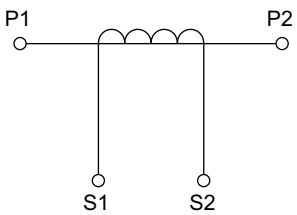
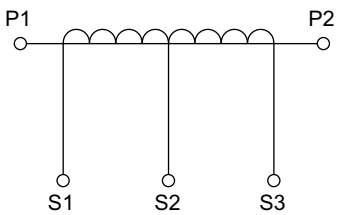
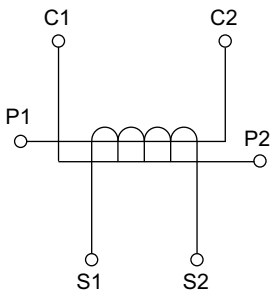
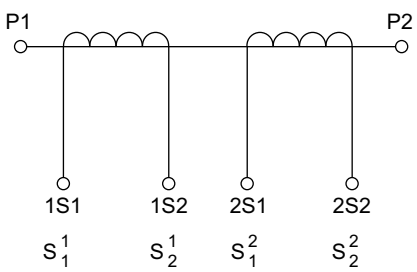
6.13.201.2 Method of marking

The marking shall consist of letters followed, or preceded where necessary, by numbers. The letters shall be in block capitals.

6.13.201.3 Markings to be used

The markings of current transformer terminals shall be as indicated in Table 208.

Table 208 – Marking of terminals

Primary terminals Secondary terminals	 Single-ratio transformer	 Transformer with an intermediate tapping on secondary winding
Primary terminals Secondary terminals	 Transformer with primary winding in 2 sections intended for connections either in series or in parallel	 Transformer with 2 secondary windings; each with its own magnetic core (two alternative markings for the secondary terminals)

6.13.201.4 Indication of relative polarities

All the terminals marked P1, S1 and C1 shall have the same polarity at the same instant.

6.13.202 Rating plate markings

6.13.202.1 General

In addition to those markings defined in IEC 61869-1:2007, Clause 6.13, all current transformers shall carry the general rating plate markings as defined in this clause. The markings related to the particular accuracy classes are given in Subclauses 6.13.202.2 to 6.13.202.6.

a) the rated primary and secondary current (e.g. 100/1 A);

b) the rated short-time thermal current (I_{th}), (e.g. Ith = 40 kA);

c) the rated dynamic current (I_{dyn}) if it differs from 2,5 × I_{th} (e.g. I_{dyn} = 85 kA);

d) on current transformers with two or more secondary windings, the use of each winding and its corresponding terminals;

e) the rated continuous thermal current if different from the rated primary current.

EXAMPLE 1
For single core current transformer with secondary taps: I_{cth} = 150 %
(meaning 150 % of the rated primary current for each tap)

EXAMPLE 2
For current transformers with several cores of different ratios
(e.g. 300/5 A and 4000/1 A): I_{cth} = 450 A
(meaning 450 A as the maximum continuous thermal current through all cores of the current transformer)

EXAMPLE 3
For current transformers with primary reconnection (4x300/1 A): I_{cth} = 4×450 A
(meaning continuous thermal current of 450, 900 or 1800 A, depending on the primary reconnection)

A current transformer satisfying the requirements of several combinations of output and accuracy class may be marked according to all of them.

EXAMPLE 4 5 VA cl. 0,5; 10 VA cl. 5P20

EXAMPLE 5 15 VA cl. 1; 7 VA cl. 0,5

EXAMPLE 6 5 VA cl.1 & 5P20

6.13.202.2 Specific marking of the rating plate of a measuring current transformer

The accuracy class and instrument security factor (if any) shall be indicated following the indication of the corresponding rated output.

EXAMPLE 1 15 VA cl. 0,5

EXAMPLE 2 15 VA cl. 0,5 FS 10

Current transformers having an extended current rating (see 5.6.201.5) shall have this rating indicated immediately following the class designation.

EXAMPLE 3 15 VA cl. 0,5 ext.150 % FS 10

For current transformers having an extended burden range (see 5.6.201.4), this rating shall directly precede the class indication.

EXAMPLE 4 1-10 VA class 0,2 (meaning burden range from 1 to 10 VA at class 0,2)

NOTE The rating plate may contain information concerning several combinations of ratios, burdens and accuracy classes that the transformer can satisfy at the same ratio. In this case, non-standard values of burden may be used.

EXAMPLE 15 VA class 1; 7 VA class 0,5

6.13.202.3 Specific marking of the rating plate of a class P protective current transformer

The rated accuracy limit factor shall be indicated following the corresponding rated output and accuracy class.

EXAMPLE 30 VA class 5P10

6.13.202.4 Specific marking of the rating plate of class PR protective current transformers

The rated accuracy limit factor shall be indicated following the corresponding rated output and accuracy class.

EXAMPLE 1 10 VA class 5PR10

If specified, the following parameters shall also be indicated:

– the secondary loop time constant (T_s);

– the upper limit of the secondary winding resistance (R_{ct});

--`,,`,,`-`-`,,`,,`,`,,`---

EXAMPLE 2 10 VA class 5PR10, Ts = 200 ms, Rct <= 2,4 Ω

6.13.202.5 Specific marking of the rating plate of class PX and PXR protective current transformers

The class requirements may be indicated as follows:

– the rated turns ratio

– the rated knee point e.m.f. (E_k);

– the upper limit of exciting current (I_e) at the rated knee point e.m.f. and/or at the stated percentage thereof;

– the upper limit of secondary winding resistance (R_{ct}).

EXAMPLE 1 class PX, Ek = 200 V, Ie <= 0,2A, Rct <= 2,0 Ω

If specified, the following parameters shall also be indicated:

– the dimensioning factor (K_x);

– the rated resistive burden (R_b).

EXAMPLE 2 Ek = 200 V, Ie <= 0,2 A, Rct <= 2,0 Ω, Kx = 40, Rb = 3,0 Ω

6.13.202.6 Specific marking of the rating plate of current transformers for transient performance

The class marking consists of the following 2 elements:

a) Definition part (compulsory)
The definition part contains the essential information which is necessary to determine whether the current transformer fulfils given requirements (consisting of duty cycle and T_p).

EXAMPLE 1 applying K_{ssc}= 20 and K_{td} = 12,5:

Rb = 5Ω, class TPX 20x12,5, Rct <= 2,8Ω

Rb = 5Ω, class TPY 20x12,5, Rct <= 2,8Ω, Ts = 900 ms

Rb = 5Ω, class TPZ 20x12,5, Rct <= 2,8Ω

NOTE For R_{ct}, its maximum value within the batch may be stated.

b) Complementary part (compulsory only if a duty cycle is specified by the customer)
The complementary part represents one of many possible duty cycles which lead to the K_{td} value specified in a).

EXAMPLE 2

Cycle 100 ms, T_p = 100 ms	meaning t'_{al} =100 ms, T_p =100 ms
Cycle (40-100)-300-40 ms, T_p = 100 ms	meaning t'_{al}=40 ms, t'=100 ms, t_{fr}=300 ms, t''_{al}=40 ms, T_p=100 ms
Cycle (100-100)-300-40 ms, T_p = 75 ms	meaning t' = t'_{al}=100 ms, t_{fr}=300 ms, t''_{al}=40 ms, T_p= 75 ms

7 Tests

7.1 General

7.1.2 Lists of tests

Table 10 of IEC 61869-1:2007 is replaced by new Table 10.

Table 10 – List of tests

Tests	Subclause
Type tests	**7.2**
Temperature-rise test	7.2.2
Impulse voltage withstand test on primary terminals	7.2.3
Wet test for outdoor type transformers	7.2.4
Electromagnetic Compatibility tests	7.2.5
Tests for accuracy	7.2.6
Verification of the degree of protection by enclosures	7.2.7
Enclosure tightness test at ambient temperature	7.2.8
Pressure test for the enclosure	7.2.9
Short-time current tests	7.2.201
Routine tests	**7.3**
Power-frequency voltage withstand tests on primary terminals	7.3.1
Partial discharge measurement	7.3.2
Power-frequency voltage withstand tests between sections	7.3.3
Power-frequency voltage withstand tests on secondary terminals	7.3.4
Tests for accuracy	7.3.5
Verification of markings	7.3.6
Enclosure tightness test at ambient temperature	7.3.7
Pressure test for the enclosure	7.3.8
Determination of the secondary winding resistance	7.3.201
Determination of the secondary loop time constant	7.3.202
Test for rated knee point e.m.f. and exciting current at rated knee point e.m.f.	7.3.203
Inter-turn overvoltage test	7.3.204
Special tests	**7.4**
Chopped impulse voltage withstand test on primary terminals	7.4.1
Multiple chopped impulse test on primary terminals	7.4.2
Measurement of capacitance and dielectric dissipation factor	7.4.3
Transmitted overvoltage test	7.4.4
Mechanical tests	7.4.5
Internal arc fault test	7.4.6
Enclosure tightness test at low and high temperatures	7.4.7
Gas dew point test	7.4.8
Corrosion test	7.4.9
Fire hazard test	7.4.10
Sample Tests	**7.5**
Determination of the remanence factor	7.5.1
Determination of the instrument security factor (FS) of measuring current transformers	7.5.2

Table 11 of IEC 61869-1:2007 is applicable with the addition of the following text:

For GIS current transformers, the accuracy tests may be performed without insulating gas.

7.2 Type tests

7.2.2 Temperature-rise test

IEC 61869-1:2007, 7.2.2 is applicable with the following additions:

7.2.2.201 Test set up

The current transformer shall be mounted in a manner representative of the mounting in service and the secondary windings shall be loaded with the burdens according to 6.4.1. However, because the position of the current transformer in each switchgear installation can be different, the test setup arrangement is left to the manufacturer.

For current transformers in three phase gas-insulated metal enclosed switchgear, all three phases have to be tested at the same time.

7.2.2.202 Measurement of the ambient temperature

The sensors to measure the ambient temperature shall be distributed around the current transformer, at an appropriate distance according to the current transformer ratings and at about half-height of the transformer, protected from direct heat radiation.

To minimise the effects of variation of cooling-air temperature, particularly during the last test period, appropriate means should be used for the temperature sensors such as heat sinks with a time-constant approximately equal to that of the transformer.

The average readings of two sensors shall be used for the test.

7.2.2.203 Duration of test

The test can be stopped when both of the following conditions are met:

– the test duration is at least equal to three times the current transformer thermal time constant;
– the rate of temperature rise of the windings (and of the top oil of oil-immersed current transformers) does not exceed 1 K per hour during three consecutive temperature rise readings.

The manufacturer shall estimate the thermal time constant by one of the following methods:

– before the test, based on the results of previous tests on a similar design. The thermal time constant shall be confirmed during the temperature rise test.
– during the test, from the temperature rise curve(s) or temperature decrease curve(s) recorded during the course of the test and calculated according to Annex 2D.
– during the test, as the point of intersection between the tangent to the temperature rise curve originating at 0 and the maximum estimated temperature rise.
– during the test, as the time elapsed until 63 % of maximum estimated temperature rise.

7.2.2.204 Temperatures and temperature rises

The purpose of the test is to determine the average temperature rise of the windings and, for oil-immersed transformers, the temperature rise of the top oil, in steady state when the losses resulting from the specified service conditions are generated in the current transformer.

The average temperature of the windings shall, when practicable, be determined by the resistance variation method, but for windings of very low resistance, thermometers, thermocouples or other appropriate temperature sensors may be employed.

Thermometers or thermocouples shall measure the temperature rise of parts other than windings. The top-oil temperature shall be measured by sensors applied to the top of metallic head directly in contact with the oil.

The temperature rises shall be determined by the difference with respect to the ambient temperature measured as indicated in 7.2.2.202.

7.2.2.205 Test modalities for current transformers having U_m <550 kV

The test shall be performed by applying the rated continuous thermal current to the primary winding.

NOTE Subject to an agreement between manufacturer and purchaser the test current may also be applied by energizing one or more secondary windings, if the voltages at the secondary terminals of the energizing cores are at least as high as if connected to rated burden, with the primary winding short-circuited and the non-supplied secondary winding(s) connected to the rated burden(s).

7.2.2.206 Test modalities for oil-immersed current transformers having $U_m \geq 550$ kV

The test shall be performed by simultaneously applying the following to the current transformer:

- the rated continuous thermal current to the primary winding;

  The test current may also be applied by energizing one or more secondary windings, if the voltages at the secondary terminals of the energizing cores are at least as high as if connected to rated burden, with the primary winding short-circuited and the non-supplied secondary winding(s) connected to the rated burden(s).
- the highest voltage of the equipment divided by $\sqrt{3}$ between the primary winding and earth. One terminal of each secondary winding shall be connected to earth.

7.2.3 Impulse voltage withstand test on primary terminals

7.2.3.1 General

IEC 61869-1:2007, 7.2.3.1 is applicable with the addition of the following:

The test voltage shall be applied between the terminals of the primary winding (connected together) and earth. The frame, case (if any), and core (if intended to be earthed) and all terminals of the secondary winding(s) shall be connected to earth.

For three-phase current transformers for gas insulated substations, each phase shall be tested, one by one. During the test on each phase, the other phases shall be earthed.

For the acceptance criteria of gas-insulated metal enclosed transformers, refer to IEC 62271-203:2011, Clause 6.2.4.

7.2.6 Tests for accuracy

7.2.6.201 Test for ratio error and phase displacement of measuring current transformers

To prove compliance with 5.6.201.3, 5.6.201.4 and 5.6.201.5, accuracy measurements shall be made at each value of current given in Table 201, Table 202 and Table 203 respectively, at the highest and at the lowest value of the specified burden range.

Transformers having an extended current rating shall be tested at the rated extended primary current instead of 120 % of rated current.

7.2.6.202 Determination of the instrument security factor (FS) of measuring current transformers

This test may be performed using the following indirect test method:

With the primary winding open-circuited, the secondary winding is energized at rated frequency by a substantially sinusoidal voltage. The voltage shall be increased until the exciting current I_e reaches $I_{sr} \times FS \times 10\ \%$.

The r.m.s. value of the obtained terminal voltage shall be less than the secondary limiting e.m.f. E_{FS} (see 3.4.206).

The exciting voltage shall be measured with an instrument which has a response proportional to the average of the rectified signal, but calibrated in r.m.s.. The exciting current shall be measured using an r.m.s measuring instrument having a minimum crest factor of 3.

If the measurement result should be put to question, a further measurement shall be performed with the direct test (see 2A.5, 2A.6). Then the result of the direct test is the reference.

NOTE The great advantage of the indirect test is that high currents are not necessary (for instance 30 000 A at a primary rated current 3 000 A and an instrument security factor 10) and also that no burdens have to be made available for 50 A. The effect of the return primary conductors is not physically effective during the indirect test. Under service conditions the effect can only increase the composite error, which is desirable for the safety of the apparatus supplied by the measuring current transformer.

7.2.6.203 Test for composite error of class P and PR protective current transformers

The following two test procedures are given:

a) Compliance with the limits of composite error given in Table 205 shall be demonstrated by a direct test in which a substantially sinusoidal current equal to the rated accuracy limit primary current is passed through the primary winding with the secondary winding connected to a burden of magnitude equal to the rated burden but having, at the discretion of the manufacturer, a power factor between 0,8 inductive and unity (see 2A.4, 2A.5, 2A.6, 2A.7.

   The test may be carried out on a transformer similar to the one being supplied, except that reduced insulation may be used, provided that the same geometrical arrangement is retained.

   As far as very high primary currents and single-bar primary winding current transformers are concerned, the distance between the return primary conductor and the current transformer should be taken into account from the point of view of reproducing service conditions.

b) For low-leakage reactance current transformers according to Annex 2C, the direct test may be replaced by the following indirect test.

   With the primary winding open-circuited, the secondary winding is energized at rated frequency by a substantially sinusoidal voltage having an r.m.s. value equal to the secondary limiting e.m.f. E_{ALF}.

   The resulting exciting current, expressed as a percentage of $I_{sr} \times ALF$ shall not exceed the composite error limit given in Table 205.

   The exciting voltage shall be measured with an instrument which has a response proportional to the average of the rectified signal, but calibrated in r.m.s.. The exciting current shall be measured using an r.m.s measuring instrument having a minimum crest factor of 3.

   In determining the composite error by the indirect method, a possible correction of the turns ratio need not be taken into account.

7.2.6.204 Test for error at limiting conditions for class TPX, TPY and TPZ protective current transformers

The purpose of the type test is to prove the compliance with the requirements at limiting conditions. For test methods refer to Annex 2B.

If the current transformer is a low-leakage reactance type according to Annex 2C, an indirect type test may be performed according to 2B.2, otherwise a direct test shall be performed according to 2B.3.

The test can be performed on a full-scale model of the active part of the current transformer assembly inclusive of all metal housings but without insulation.

7.2.6.205 Test of low-leakage reactance type for class PX and PXR protective current transformers

The proof of low-leakage reactance shall be made according to Annex 2C.

7.2.6.206 Determination of the remanence factor class PR, TPY, and PXR protective current transformers

To prove compliance with

5.6.202.3.5 for class PR,

5.6.202.5.2 for class TPY,

5.6.202.4 for class PXR,

the remanence factor (K_R) shall be determined. For test methods, refer to 2B.2.

7.2.201 Short-time current tests

To verify the requirements of rated short-time thermal current and of rated dynamic current given in 5.204, the two following tests are specified.

The thermal test shall be made with the secondary winding(s) short-circuited, and at a current I' for a time t', so that

$$I'^2 \times t' \geq I_{th}^2 \times t$$

where t is the specified duration of the short-time thermal current.

t' shall have a value between 0,5 s and 5 s.

The dynamic test shall be made with the secondary winding(s) short-circuited, and with a primary current the peak value of which is not less than the rated dynamic current (I_{dyn}) for at least one peak.

The dynamic test may be combined with the thermal test above, provided the first major peak current of that test is not less than the rated dynamic current (I_{dyn}).

The transformer shall be deemed to have passed these tests if, after cooling to ambient temperature (between 10 °C and 40 °C), it satisfies the following requirements:

a) it is not visibly damaged;
b) its errors after demagnetization do not differ from those recorded before the tests by more than half the limits of error appropriate to its accuracy class;
c) it withstands the dielectric tests specified in 7.3.1, 7.3.2, 7.3.3 and 7.3.4 but with the test voltages or currents reduced to 90 % of those given;
d) on examination, the insulation next to the surface of the conductor does not show significant deterioration (e.g. carbonization).

The examination d) is not required if the current density in the primary winding, corresponding to the rated short-time thermal current (I_{th}), does not exceed:

– 180 A/mm^2 where the winding is of copper of conductivity not less than 97 % of the value given in IEC 60028;

– 120 A/mm^2 where the winding is of aluminium of conductivity not less than 97 % of the value given in IEC 60121.

NOTE Experience has shown that in service the requirements for thermal rating are generally fulfilled in the case of class A insulation, provided that the current density in the primary winding, corresponding to the rated short-time thermal current, does not exceed the above-mentioned values.

7.3 Routine tests

7.3.1 Power-frequency voltage withstand tests on primary terminals

This clause of IEC 61689-1 is applicable with the addition of the following:

The test voltage shall be applied between the short-circuited primary winding and earth. The short-circuited secondary winding(s), the frame, case (if any) and core (if there is a special earth terminal) shall be connected to earth.

7.3.5 Tests for accuracy

7.3.5.201 Tests for ratio error and phase displacement of measuring current transformers

The routine test for accuracy is in principle the same as the type test in 7.2.6.201, but routine tests at a reduced number of currents and/or burdens are permissible provided it has been shown by type tests on a similar transformer that such a reduced number of tests are sufficient to prove compliance with 5.6.201.3.

7.3.5.202 Tests for ratio error and phase displacement of class P and PR protective current transformers

Tests shall be made at rated primary current and rated burden to prove compliance with 5.6.202.2 and 5.6.202.3 respectively, with respect of ratio error and phase displacement.

7.3.5.203 Test for composite error of class P and PR protective current transformers

For low-leakage reactance current transformers (see Annex 2C), the routine test is the same as the indirect type test described in item b) of 7.2.6.203.

For other transformers, the indirect test described in item b) of 7.2.6.203 may be used, but a correction factor for the exciting current shall be applied to the results. This factor is obtained from a comparison between the results of direct and indirect tests applied to a transformer of the same type as the one under consideration, the accuracy limit factor and the conditions of loading being the same. In such cases, the manufacturer should hold test reports available.

NOTE 1 The correction factor is equal to the ratio of the composite error obtained by the direct method, and the exciting current expressed as a percentage of I_{sr} x ALF, as determined by the indirect method.

NOTE 2 The expression “transformer of the same type” implies that the ampere turns are similar irrespective of ratio, and that the materials and the geometrical arrangements of the iron core and the secondary windings are identical.

7.3.5.204 Test for ratio error and phase displacement for class TPX, TPY and TPZ protective current transformers

The ratio error and the phase displacement shall be measured at rated current to prove compliance with 5.6.202.5.1.

The results shall correspond to a secondary winding temperature of 75 °C.

Therefore, the actual value of the secondary winding temperature shall be measured and the difference to its value corrected to 75 °C shall be determined. The error measurement shall be made with the burden R_b increased by the above mentioned difference of winding resistance.

Alternatively, for TPY and TPZ cores the phase displacement at 75 °C ($\Delta\varphi_{75}$) may be determined by measuring at ambient temperature ($\Delta\varphi_{amb}$) and calculating as follows:

$$\Delta\varphi_{75} = \Delta\varphi_{amb} \frac{R_{ct} + R_b}{R_{ctamb} + R_b}$$

where R_{ctamb} is the winding resistance at the ambient temperature. The influence of this resistance correction on the ratio error can be neglected.

For type and routine testing, a direct test method (using a primary current source and a reference current transformer) has to be applied. For low-leakage reactance current transformers, an indirect test method is given in Annex 2E. It may be applied for on-site measurements and for monitoring purposes.

7.3.5.205 Test for error at limiting conditions for class TPX, TPY and TPZ protective current transformers

The purpose of the routine test is to prove compliance with the requirements at limiting conditions.

If the current transformer is a low-leakage reactance type according to Annex 2C, an indirect test shall be performed according to 2B.2.

If compliance with the requirements of low-leakage reactance design cannot be established, but a type test report of a current transformer of the same type is available, an indirect test shall be performed according to 2B.2. In this case, a possibly available factor of construction F_C shall be considered if the factor is greater than 1,1. If such a type test is not available, one unit of the batch shall be type-tested and used as reference for the indirect testing of the remaining units.

NOTE 1 When determining the factor of construction F_C, laboratories have to cope with a high measuring uncertainty due to the necessity of integrating the e.m.f. and due to nonlinear parameters at accuracy limiting conditions. Furthermore, only few laboratories are in the position to provide the required duty cycles, and these with limited precision only. As a consequence, the results of direct and indirect tests usually do not match nicely, and unreliable F_C values may result. Therefore, little experience exists in this field.

NOTE 2 The expression “transformer of the same type” implies that the ampere turns are similar irrespective of ratio, and that the materials and the geometrical arrangements of the iron core and the secondary windings are identical.

7.3.5.206 Test for turns ratio error for class PX and PXR protective current transformers

For class PX and class PXR, the turns ratio error shall be determined in accordance with Annex 2F.

The test may be substituted by performing the measurement of the ratio error with a zero-Ω burden connected, subject to an agreement between manufacturer and purchaser.

The turns ratio error shall not exceed the limits given in 5.6.202.4.

7.3.201 Determination of the secondary winding resistance (R_{ct})

The secondary winding resistance (R_{ct}) shall be measured for current transformers of the following classes, to prove compliance with the appropriate clauses:

class PR: clauses 5.6.202.3.7 and 6.13.202.4 (if parameter specified)

class PX, PXR: clauses 5.6.202.4 and 6.13.202.5

class TPX, TPY, TPZ: clause 6.13.202.6

An appropriate correction shall be made to meet 75°C or other such temperature as may have been specified.

For classes PR, PX and PXR, the value obtained when corrected to 75 °C shall not exceed the specified upper limit (if any).

7.3.202 Determination of the secondary loop time constant (T_s)

The secondary loop time constant (T_s) shall be determined at current transformers with the following classes, to prove compliance with the appropriate clauses:

class PR: clause 5.6.202.3.6 (if parameter specified)

class TPY clause 5.6.202.5.3

The measured value shall not differ from any specified value by more than ±30 %.

For the determination of T_s, the following formula shall be used (For the determination of L_m: see 2B.2):

$$T_S = \frac{L_m}{(R_{ct} + R_b)}$$

In cases where the burden is defined as rated output, given in VA, R_b is taken as being equal to the resistive part of the burden.

Alternatively, T_s may be determined according to the following equation:

$$T_S = \frac{1}{2\pi f_R \times \tan(\Delta\varphi)}$$

If the phase displacement $\Delta\varphi$ is expressed in minutes, the following approximate formula may be applied:

$$T_S[s] = \frac{3438}{2\pi f_R \times \Delta\varphi \ [min]}$$

NOTE 1 The method using Δφ may cause difficulties for current transformers with high transformation ratio and small phase displacement due to uncertainty of the measurement of low phase displacement.

NOTE 2 For class TPZ cores, T_s has not to be stated explicitly. The accuracy requirement of Δφ = (180 ± 18) min is verified as routine test. T_s is then provided by the above mentioned formula.

7.3.203 Test for rated knee point e.m.f. (E_k) and exciting current at E_k

The rated knee point e.m.f. shall be verified and the exciting current I_e at rated knee point e.m.f. E_k shall be measured for current transformers with the following classes, to prove compliance with the appropriate clause:

class PX, PXR: clause 5.6.202.4

A suitable sinusoidal exciting voltage with rated frequency shall be applied to the secondary terminals of the full winding of the transformer, all other terminals being open-circuited, and the exciting current shall be measured.

The exciting voltage shall be measured with an instrument which has a response proportional to the average of the rectified signal, but calibrated in r.m.s.. The exciting current shall be measured using an r.m.s measuring instrument having a minimum crest factor of 3.

The excitation characteristic shall be plotted at least up to a voltage equal to 1.1 x E_k.

At a voltage equal to E_k, the knee point condition according to 3.4.215 shall be fulfilled.

The exciting current I_e at a voltage equal to E_k (or at any stated percentage), shall not exceed the specified limit.

NOTE 1 For selectable-ratio current transformers with tapped secondary windings, the excitation characteristic for other than the maximum ratio may be calculated. For every measuring point, the following equations can be applied:

$$E_2 = E_1 \times \frac{k_{r2}}{k_{r1}}$$

$$I_{e2} = I_{e1} \times \frac{k_{r1}}{k_{r2}}$$

where k_{r1}, k_{r2} are the two rated transformation ratios;

E_1, E_2 are the two appropriate secondary e.m.f values;

I_{e1}, I_{e2} are the two appropriate exciting current values.

NOTE 2 The number of measurement points may be agreed between the manufacturer and the purchaser.

NOTE 3 Usually, the actual knee point e.m.f. is determined, which must be higher than the rated knee point e.m.f E_k.

7.3.204 Inter-turn overvoltage test

Tests shall be performed to demonstrate compliance with 5.3.201.

The inter-turn overvoltage test shall be performed at the full winding in accordance with one of the following procedures. If not otherwise agreed, the choice of the procedure is left to the manufacturer.

Procedure A: with the secondary windings open-circuited (or connected to a high impedance device which reads peak voltage), a substantially sinusoidal current at a frequency between 40 Hz and 60 Hz and of r.m.s. value equal to the rated primary current (or rated extended primary current if specified) shall be applied for 60 s to the primary winding.

The applied current shall be limited if the test voltage given in 5.3.201 is obtained before reaching the rated primary current (or rated extended primary current).

If the test voltage given in 5.3.201 is not reached at maximum primary current, the obtained voltage shall be regarded as the test voltage.

Procedure B: with the primary winding open-circuited, the test voltage given in 5.3.201 (at some suitable test frequency) shall be applied for 60 s to the terminals of each secondary winding.

The r.m.s. value of the secondary current shall not exceed the rated secondary current (or the appropriate extended value if specified).

The test frequency shall be chosen in order to reach the test voltage, but it shall not exceed 400 Hz.

If the test voltage given in 5.3.201 is not reached at maximum secondary current and maximum test frequency, the obtained voltage shall be regarded as the test voltage.

When the test frequency exceeds twice the rated frequency, the duration of the test t shall be reduced as below:

$$t = 120\,\text{s} \times \frac{f_\text{R}}{f_\text{T}}$$

where

f_R is the rated frequency;

f_T is the test frequency;

with a minimum t of 15 s.

NOTE The inter-turn overvoltage test is not a test carried out to verify the suitability of a current transformer to operate with the secondary winding open-circuited. Current transformers should not be operated with the secondary winding open-circuited because of the potentially dangerous overvoltage and overheating which can occur.

7.4 Special tests

7.4.3 Measurement of capacitance and dielectric dissipation factor

This clause of IEC 61869-1:2007 is applicable with the addition of the following:

The test voltage shall be applied between the short-circuited primary winding terminals and earth. Generally, the short-circuited secondary winding(s), any screen, and the insulated metal casing shall be connected to the measuring device. If the current transformer has a special terminal suitable for this measurement, the other low-voltage terminals shall be short-circuited and connected together with the metal casing to the earth or the screen of the measuring device.

The test shall be performed with the current transformer at ambient temperature, the value of which shall be recorded.

7.4.6 Internal arc fault test

This clause of IEC 61869-1:2007 is applicable with the addition of the following note:

NOTE For top-core oil-immersed current transformers, the area in which in-service failure occurs, the incept is, in many cases, located in the upper part of the main insulation. For hair-pin oil-immersed current transformers this area is generally located in the bottom part of the main insulation.

7.5 Sample tests

7.5.1 Determination of the remanence factor

Usually, as sample test for each production series, the type test given in 7.2.6.206 is repeated.

7.5.2 Determination of the instrument security factor (*FS*) of measuring current transformers

Usually, as sample test for each production series, the type test given in 7.2.6.202 is repeated using the indirect method.

Annex 2A
(normative)

Protective current transformers classes P, PR

2A.1 Vector diagram

If consideration is given to a current transformer which is assumed to contain only linear electric and magnetic components in itself and in its burden, then, under the further assumption of sinusoidal primary current, all the currents, voltages and magnetic fluxes will be sinusoidal, and the performance can be illustrated by a vector diagram as shown in Figure 2A.1.

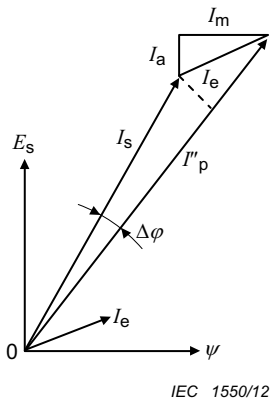


Figure 2A.1 – Vector Diagram

In Figure 2A.1, I_s represents the secondary current. It flows through the impedance of the secondary winding and the burden which determines the magnitude and direction of the necessary induced e.m.f. E_s and of the secondary linked flux ψ which is perpendicular to the e.m.f. vector. This flux is maintained by the exciting current I_e, having a magnetizing component I_m parallel to the secondary linked flux ψ, and a loss (or active) component I_a parallel to the e.m.f.. The vector sum of the secondary current I_s and the exciting current I_e is the vector I''_p representing the primary current multiplied by the actual turns ratio (number of primary turns to number of secondary turns).

Thus, for a current transformer with the inverse of the actual turns ratio equal to the rated transformation ratio, the difference in the lengths of the vectors I_s and $I''_{p,}$ related to the length of $I''_{p,}$ is the ratio error (ε) according to the definition of 3.4.3, and the angular difference $\Delta\varphi$ is the phase displacement according to 3.4.4.

2A.2 Turns correction

When the inverse of the actual turns ratio is different from (usually less than) the rated transformation ratio, the current transformer is said to have turns correction. Thus, in evaluating performance, it is necessary to distinguish between $I''_{p,}$ the primary current multiplied by the actual turns ratio, and $I'_{p,}$ the primary current divided by the rated transformation ratio. Absence of turns correction means $I'_p = I''_{p.}$ If turns correction is present, I'_p is different from $I''_{p,}$ and since I''_p is used in the vector diagram and I'_p is used for the determination of the ratio error (ε), it can be seen that turns correction has an influence on the ratio error (ε) (and may be used deliberately for that purpose). However, the vectors I'_p and I''_p have the same direction, so turns correction has no influence on phase displacement.

It will also be apparent that the influence of turns correction on composite error is less than its influence on ratio error (ε).

2A.3 The error triangle

In Figure 2A.2, the upper part of Figure 2A.1 is re-drawn to a larger scale and under the further assumption that the phase displacement is so small that for practical purposes the two vectors I_s and I''_p can be considered to be parallel. Assuming again that there is no turns correction, it will be seen by projecting I_e to I_p that to a good approximation the in-phase component (ΔI) of I_e can be used instead of the arithmetic difference between I''_p and I_s to obtain the ratio error (ε). Similarly, the quadrature component (ΔI_q) *of* I_e can be used to express the phase displacement.

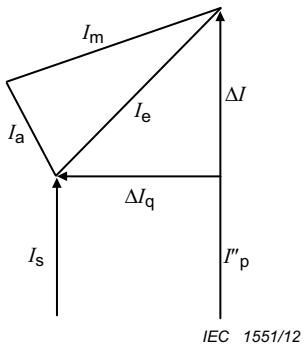


Figure 2A.2 – Error triangle

It can further be seen that under the given assumptions the exciting current I_e divided by I''_p is equal to the composite error according to 3.4.203.

Thus, for a current transformer without turns correction and under conditions where a vector representation is justifiable, the ratio error (ε), phase displacement and composite error form a right-angled triangle.

In this triangle, the hypotenuse representing the composite error is dependent on the magnitude of the total burden impedance consisting of burden and secondary winding, while the division between ratio error (ε) and phase displacement depends on the power factors of the total burden impedance and of the exciting current. Zero phase displacement will result when these two power factors are equal, i.e. when I_s and I_e are in phase.

2A.4 Composite error

The most important application, however, of the concept of composite error is under conditions where a vector representation cannot be justified because non-linear conditions introduce higher harmonics in the exciting current and in the secondary current (see Figure 2A.3).

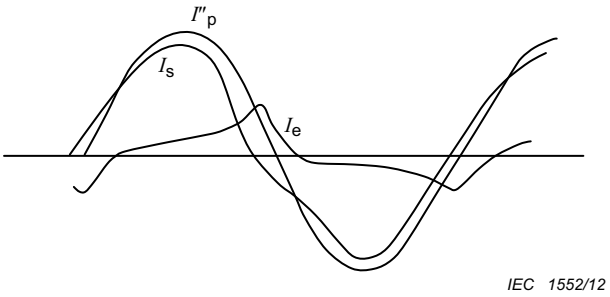


Figure 2A.3 – Typical current waveforms

It is for this reason that the composite error is defined as in 3.4.203 and not in the far simpler way as the vector sum of ratio error (ε) and phase displacement as shown in Figure 2A.2.

Thus, in the general case, the composite error also represents the deviations from the ideal current transformer that are caused by the presence in the secondary winding of higher harmonics which do not exist in the primary. (The primary current is always considered sinusoidal for the purposes of this standard.)

2A.5 Direct test for composite error

The standard method is given by recording and digitizing the waveforms of the primary current and of the secondary current, and by calculating the composite error using numerical integration according to its definition in 3.4.203.

Nevertheless, in this annex, the traditional methods for the determination of the composite error with analogue instruments are described.

Figure 2A.4 shows a current transformer having a turns ratio of 1:1. It is connected to a source of primary (sinusoidal) current, a secondary burden Z_B with linear characteristics and to an ammeter in such a manner that both the primary and secondary currents pass through the ammeter but in opposite directions. In this manner, the resultant current through the ammeter will be equal to the exciting current under the prevailing conditions of sinusoidal primary current, and the r.m.s. value of that current related to the r.m.s. value of the primary current is the composite error according to 3.4.203, the relation being expressed as a percentage.

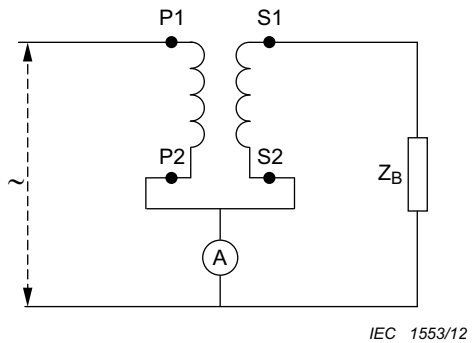


Figure 2A.4 – Basic circuit for 1:1 current transformer

Figure 2A.4 therefore represents the basic circuit for the direct measurement of composite error.

Figure 2A.5 represents the basic circuit for the direct measurement of composite error for current transformers having rated transformation ratios differing from unity. It shows two current transformers of the same rated transformation ratio. The current transformer marked N is assumed to have negligible composite error under the prevailing conditions (minimum burden), while the current transformer under test and marked X is connected to its rated burden.

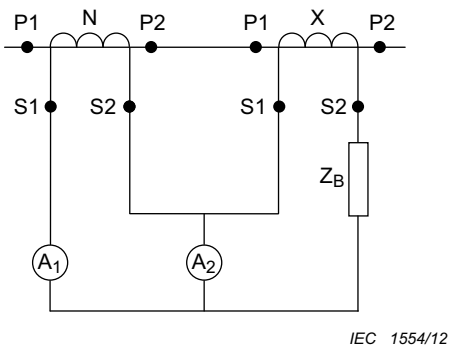


Figure 2A.5 – Basic circuit for current transformer with any ratio

They are both fed from the same source of primary sinusoidal current, and an ammeter is connected to measure the difference between the two secondary currents. Under these conditions, the r.m.s. value of the current in the ammeter A_2 related to the r.m.s. value of the current in ammeter A_1 is the composite error of transformer X, the relation being expressed as a percentage.

With this method, it is necessary that the composite error of transformer N is truly negligible under the conditions of use. It is not sufficient that transformer N has a known composite error since, because of the highly complicated nature of composite error (distorted waveform), any composite error of the reference transformer N cannot be used to correct the test results.

2A.6 Alternative method for the direct measurement of composite error

Alternative means may be used for the measurement of composite error and one method is shown in Figure 2A.6.

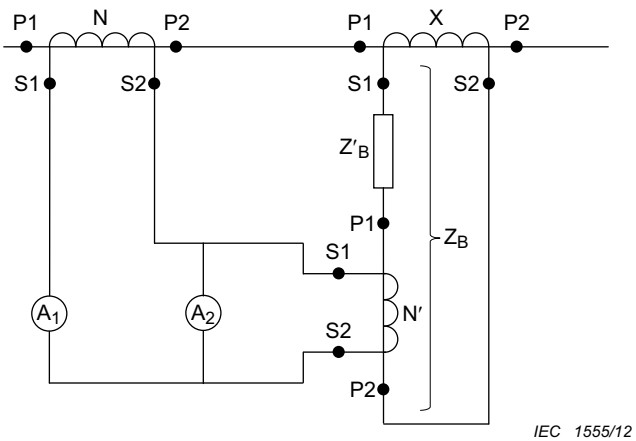


Figure 2A.6 – Alternative test circuit

Whilst the method shown in Figure 2A.5 requires a “special” reference transformer N of the same rated transformation ratio as the transformer X and having negligible composite error at

the accuracy limit primary current, the method shown in Figure 2A.6, enables standard reference current transformers N and N′ to be used at or around their rated primary currents. It is still essential, however, for these reference transformers to have negligible composite errors but the requirement is easier to satisfy.

In Figure 2A.6, X is the transformer under test. N is a standard reference transformer with a rated primary current of the same order of magnitude as the rated accuracy limit primary current of transformer X (the current at which the test is to be made). N′ is a standard reference transformer having a rated primary current of the order of magnitude of the secondary current corresponding to the rated accuracy limit primary current of transformer X. It should be noted that the transformer N′ constitutes a part of the burden Z_B of transformer X and must therefore be taken into account in determining the value of the burden Z_B. A_1 and A_2 are two ammeters and care must be taken that A_2 measures the difference between the secondary currents of transformers N and N′.

If the rated transformation ratio of transformer N is k_r, of transformer X is k_{rx} and of transformer N′ is k'_r, the ratio k_r must equal the product of k'_r and k_{rx}:

$$k_r = k'_r \times k_{rx}$$

Under these conditions, the r.m.s. value of the current in ammeter A_2, related to the current in ammeter A_1, is the composite error of transformer X, the relation being expressed as a percentage.

NOTE When using the methods shown in Figure 2A.5 and Figure 2A.6, care should be taken to use a low impedance instrument for A_2 since the voltage across this ammeter (divided by the ratio of transformer N′ in the case of Figure 2A.6) constitutes part of the burden voltage of transformer X and tends to reduce the burden on this transformer. Similarly, this ammeter voltage increases the burden on transformer N.

2A.7 Use of composite error

The numeric value of the composite error will never be less than the vector sum of the ratio error (ε) and the phase displacement (the latter being expressed in centiradians).

Consequently, the composite error always indicates the highest possible value of ratio error (ε) or phase displacement.

The ratio error (ε) is of particular interest in the operation of overcurrent relays, and the phase displacement in the operation of phase sensitive relays (e.g. directional relays).

In the case of differential relays, it is the combination of the composite errors of the current transformers involved, which must be considered.

An additional advantage of a limitation of composite error is the resulting limitation of the harmonic content of the secondary current, which is necessary for the correct operation of certain types of relays.

Annex 2B
(normative)

Protective current transformer classes for transient performance

2B.1 Basic theoretical equations for transient dimensioning

2B.1.1 Short-circuit

The following equations refer to a C-O duty cycle. C-O-C-O duty cycles are treated in 2B.1.3.

The general expression for the instantaneous value of a short-circuit current may be defined:

$$i_{\mathrm{k}}(t) = \sqrt{2}\ I_{\mathrm{psc}}\left[e^{-\mathrm{t}/T_{\mathrm{p}}}\cos(\gamma-\varphi) - \cos(\omega\, t+\gamma-\varphi)\right] \tag{2B.1}$$

where

I_{psc} is the r.m.s. value of primary symmetrical short-circuit current $I_{\mathrm{psc}} = K_{\mathrm{ssc}} \times I_{\mathrm{pr}}$;

$T_{\mathrm{p}} = \dfrac{L_{\mathrm{p}}}{R_{\mathrm{p}}}$ is the primary time constant;

γ is the switching or fault inception angle;

$\varphi = \arctan\dfrac{X_{\mathrm{p}}}{R_{\mathrm{p}}} = \arctan\left(\omega\, T_{\mathrm{p}}\right)$ is the phase angle of the system short-circuit impedance;

ω is the angular frequency $2\pi f_{\mathrm{R}}$;

when the equivalent voltage source in the short-circuit with R_{p} and X_{p} is

$$u(t) = -U_{\mathrm{max}}\cos(\omega\, t+\gamma) \tag{2B.2}$$

For simplification purposes the fault inception angle and system impedance angle can be summed up to one single angle which makes the calculation easier to understand from the mathematical point of view.

$$\theta = \gamma - \varphi \tag{2B.3}$$

$$i_{\mathrm{k}}(t) = \sqrt{2}\ I_{\mathrm{psc}}\left[e^{-\mathrm{t}/T_{\mathrm{p}}}\cos(\theta) - \cos(\omega\, t+\theta)\right] \tag{2B.4}$$

The angles θ and γ both describe the possibility of varying the fault inception angle and therefore can be applied alternatively as suitable but according to their definition.

Figure 2B.1 shows two typical primary short-circuit currents. The first one occurs with a fault inception angle of $\gamma = 90°$ which leads to the highest peak current and the highest peak of secondary linked flux for long t'_{al} (Figure 2B.2) whereas the second one occurs with $\gamma = 140°$, which leads to a lower asymmetry. Cases like the latter one are important for short t'_{al}, because, during the first half cycle, the current and flux are temporarily higher than in the case of $\gamma = 90°$.

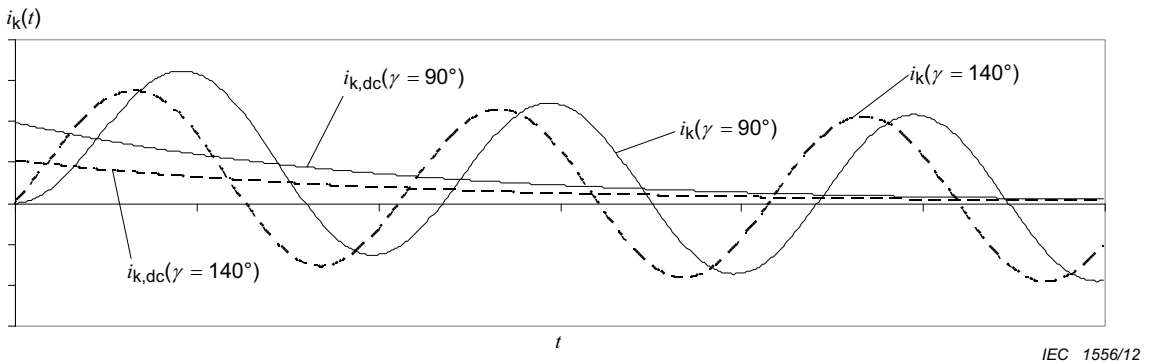


Figure 2B.1 – Short-circuit current for two different fault inception angles

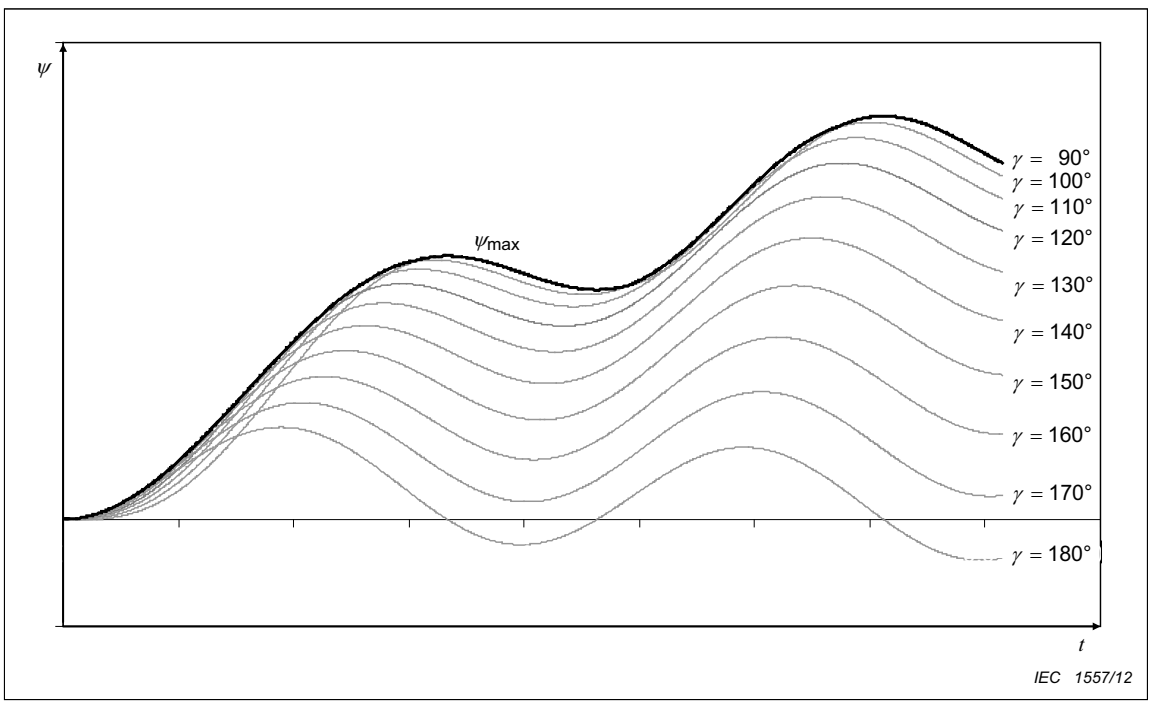


Figure 2B.2 – $\psi_{max}(t)$ as the curve of the highest flux values, considering all relevant fault inception angles γ

A possibly reduced range of fault inception angle can be used to define a reduced asymmetry which may lead to a reduced factor K_{td} in some special cases.

NOTE The possibility of restricting the current inception angle is not covered in this standard, but will be discussed in the Technical Report IEC 61869-100.

2B.1.2 Transient dimensioning factor K_{td}

The transient dimensioning factor K_{td} is the final parameter for the core dimensioning and is given on the rating plate. It can be calculated from different functions of the transient factor K_{tf} as given in the equations below and as shown in Figure 2B.3.

In some cases, the protection system may require a t'_{al} value which is not constant and depends on various parameters of the short-circuit current. Therefore the transient dimensioning factor K_{td} can also be obtained from relay stability type tests and given by the manufacturer of the protection system.

The transient factor K_{tf} given in this section is derived from the differential equation of the equivalent circuit with a constant inductivity of the current transformer core, with an ohmic burden and without consideration of remanence. In this annex, the solutions of the differential equation are given either as curve diagrams or as simplified formulas.

NOTE The differential equation and the exact solution is given in the Technical Report IEC 61869-100 TR.

K_{tf} and the secondary linked flux depend likewise on time and, in the end, on the time to accuracy limit t'_{al} required by the protection system. By calculating with the linear inductivity, the solution is only valid up to the first saturation of the current transformer.

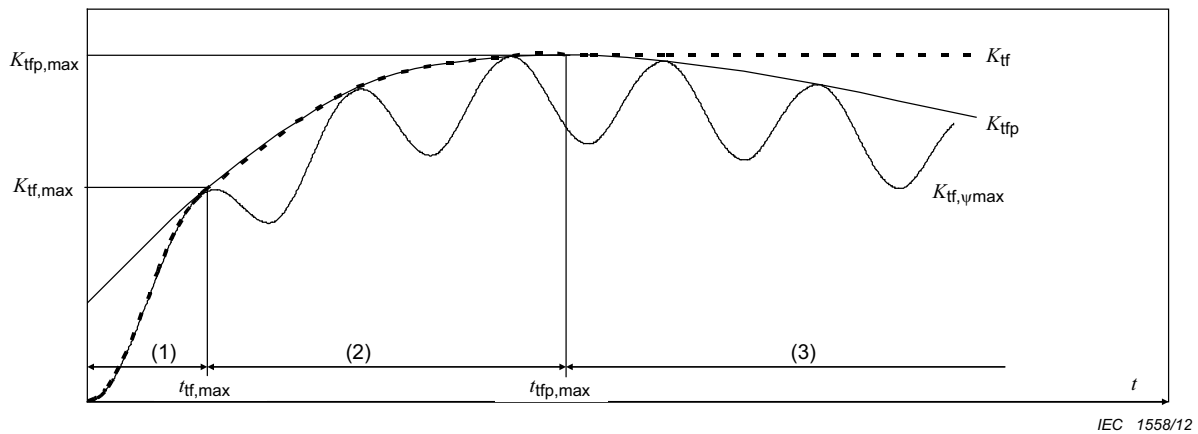


Figure 2B.3 – Relevant time ranges for calculation of transient factor

In Figure 2B.3, the curve $K_{tf,\psi max}$ is built as follows:

For every time point of the ψ_{max} curve (Figure 2B.2), the K_{tf} value is calculated according its definition in 3.4.233. K_{tfp} is the appropriate envelope curve. Three ranges have to be distinguished, defined by three functions of K_{tf}:

Range 1: $0 \leq t_{al} < t_{tf,max}$:

In the first time range, the K_{tf} curve follows the $K_{tf,\psi max}$ curve. The time range begins at zero time and ends when the curve of $K_{tf,\psi max}$ touches its envelope curve of peaks K_{tfp} at the time

$$t_{tf,max} = \frac{\pi + \varphi}{\omega} \tag{2B.5}$$

Eqn (2B.5) is simplified with $\gamma = 90°$ from a more general formula, but it is suitable for practical application.

Within this time range, $K_{tf,\psi max}$ considers the worst-case switching angle $\theta(t'_{al})$ which leads to the highest flux at the time to accuracy limit t'_{al}. Figure 2B.4 to Figure 2B.6 show the K_{tf} curves versus the primary time constant T_p for different values of t'_{al}. A high secondary time constant T_s was chosen in the calculation. Lower T_s values lead to slightly lower K_{tf} values.

NOTE A larger variety of curves is given in the Technical Report IEC 61869-100 TR.

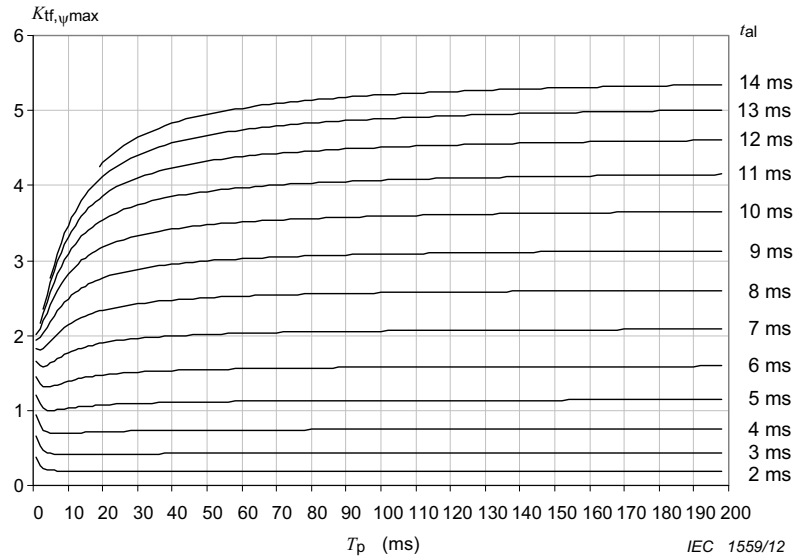


Figure 2B.4 – Determination of K_{tf} in time range 1 at 50 Hz for T_s = 1,8 s

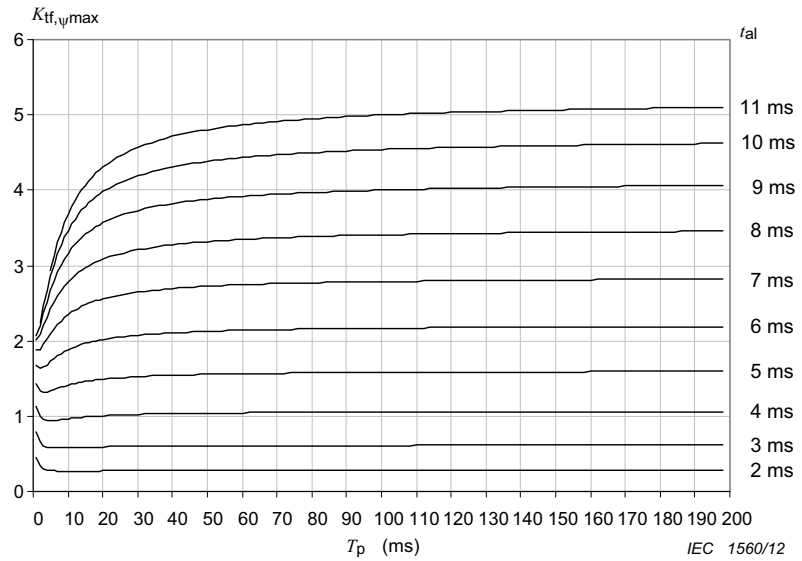


Figure 2B.5 – Determination of K_{tf} in time range 1 at 60 Hz for T_s = 1,5 s

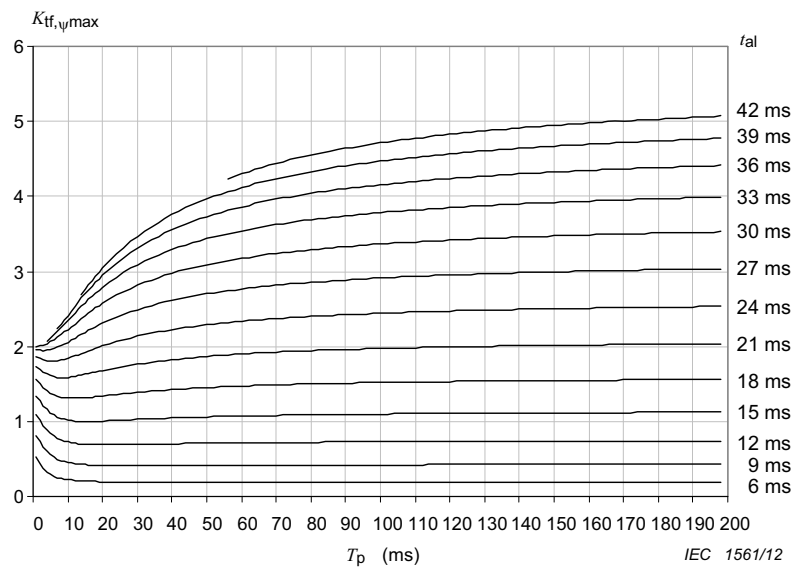


Figure 2B.6 – Determination of K_{tf} in time range 1 at 16,7 Hz for T_s = 5,5 s

Range 2: $t_{\text{tf,max}} \leq t_{\text{al}} < t_{\text{tfp,max}}$

In the second time range, the K_{tf} curve follows the envelope curve K_{tfp} for $\gamma = 90°$, which leads to the highest peak flux, therefore $\theta = 90°\text{-}\ \varphi$.

$$K_{\text{tfp}} = \frac{\omega T_{\text{S}} T_{\text{P}}}{T_{\text{P}} - T_{\text{S}}} \cos(\theta) \left(e^{-t_{\text{al}}/T_{\text{P}}} - e^{-t_{\text{al}}/T_{\text{S}}} \right) + \sin(\theta) e^{-t_{\text{al}}/T_{\text{S}}} + 1 \tag{2B.6}$$

The time range ends at the maximum of the K_{tfp} curve at the time

$$t_{\text{tfp,max}} = \frac{T_{\text{P}} T_{\text{S}}}{T_{\text{P}} - T_{\text{S}}} \ln \frac{\frac{T_{\text{P}}}{T_{\text{S}}} \cos(\theta) + \frac{T_{\text{S}} - T_{\text{P}}}{\omega T_{\text{S}}^2} \sin(\theta)}{\cos(\theta)} \tag{2B.7}$$

Range 3: $t_{\text{tfp,max}} \leq t_{\text{al}}$

In the third time range, K_{tf} assumes the constant value $K_{\text{tfp,max}}$, given in eqn. (2B.8). It is defined as the maximum value of the K_{tfp} curve.

$$K_{\text{tfp,max}} = \left(\omega T_{\text{P}} \cos(\theta) + \frac{T_{\text{P}} + T_{\text{S}}}{T_{\text{S}}} \sin(\theta) \right) \times \left[\frac{\frac{T_{\text{P}}}{T_{\text{S}}} \cos(\theta) + \frac{T_{\text{S}} - T_{\text{P}}}{\omega T_{\text{S}}^2} \sin(\theta)}{\cos(\theta)} \right]^{\frac{T_{\text{P}}}{T_{\text{S}} - T_{\text{P}}}} + 1 \tag{2B.8}$$

2B.1.3 C-O-C-O duty cycles

The transient dimensioning for auto-reclosure duty cycles has to be done separately for each cycle according to the equations given above.

For cores having a high secondary time constant (typically TPX cores), there is no significant flux declination after t'.

$$K_{\text{td,(C-O-C-O)}} = K_{\text{td}}(t') + K_{\text{td}}(t''_{\text{al}}) \tag{2B.9}$$

For cores having a low secondary time constant (typically TPY and TPZ cores), the secondary linked flux declines exponentially with the secondary time constant T_{S} during the fault repetition time t_{fr}. In this case, no analytical formula exists for the time argument t in the term for the first cycle, and several case differentiations may be necessary.

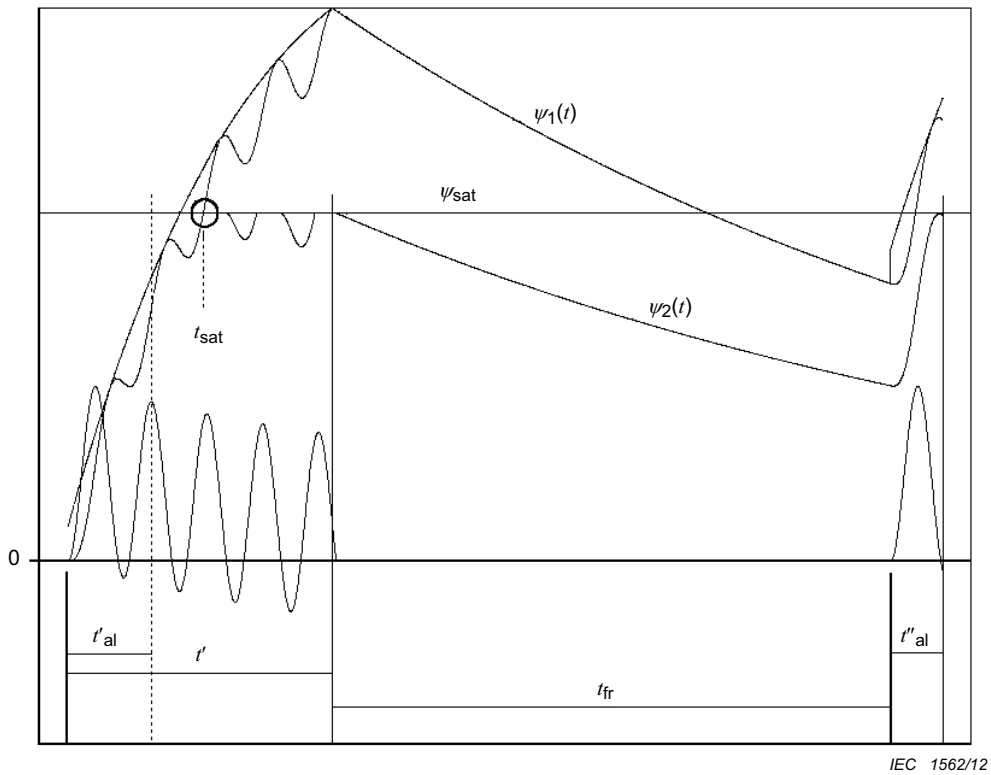


Figure 2B.7 – Limiting the magnetic flux by considering core saturation

Fig. 2B.7 shows a typical case where saturation is reached after t'_{al}. The flux (ψ_2(t)) is limited to saturation flux(ψ_{sat}) before t' is reached. During t_{fr}, it declines to a value which is low enough to remain below saturation up to t''_{al}. Ignoring saturation (shoved by curve ψ_1(t)), the declined flux starts from a higher level at the beginning of the second cycle. This example demonstrates the interdependency between the core dimensioning in the first and in the second cycle, and the determination of K_{td}.

NOTE 1 The formula for the C-O-C-O-cycle, which was given in the preceding standard IEC 60044-6, ignores saturation within the first cycle and leads in many cases to unnecessarily high K_{td} values. See Fig. 2B.7.

It is therefore recommended to draw a graph similar to the one in Fig. 2B.7, in order to make oneself familiar with the actual situation. The following equation provides an upper limit for K_{td}:

$$K_{td,(C-O-C-O)max} = \max \left\{ K_{td}(t'_{al}),\ K_{td}(t')e^{-(t_{fr}+t''_{al})/T_s} + K_{td}(t''_{al}) \right\} \quad (2B.10)$$

NOTE 2 In Technical Report IEC 61869-100 TR calculation methods are given which may be used to determine the K_{td} value.

2B.2 Measurement of the core magnetization characteristic

2B.2.1 General

Measuring the core magnetization characteristic implies

- the measurement of the magnetizing inductance L_m;
- the measurement of the remanence factor K_R;
- the determination of the error at limiting conditions using an indirect method.

All of these are based on the following relationship. If an arbitrary voltage $u(t)$ is applied to the secondary terminals (see Figure 2B.8), the flux $\psi(t)$ linked through the secondary winding at time t is related to this voltage through the equation:

$$\psi(t) = \int_0^t (u(t) - R_{ct} \times i_m(t))dt \qquad (2B.11)$$

where i_m is the instantaneous value of the magnetizing current.

NOTE As the term "exciting current" is reserved for the r.m.s. value using a.c. quantities (see 3.3.207), i_m and the term "magnetizing current" are used for instantaneous values in the d.c. method and capacitor discharge method.

The methods described in the following clauses take advantage of this relationship.

The effect of the voltage drop across the secondary winding resistance shall be estimated. If it exceeds 2 %, this drop shall be deduced from the voltage measured.

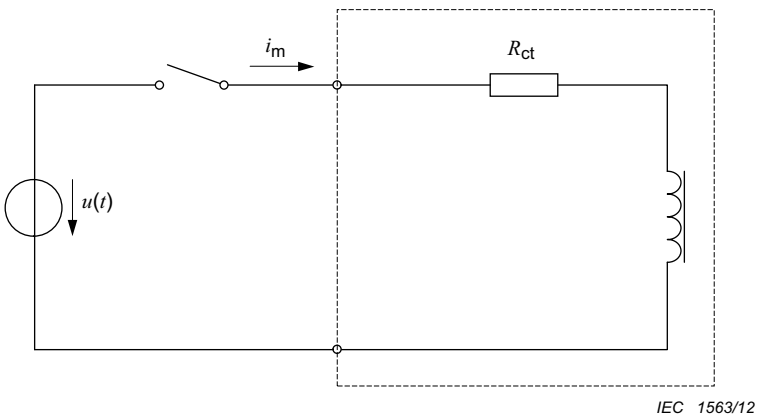


Figure 2B.8 – Basic circuit

For TPX current transformers, it is necessary to demagnetize the core before each test, because of the high remanence factor. For TPY current transformers the remanent flux is often so low that it can be neglected. Demagnetization requires additional means by which the core can be subjected to slowly decreasing hysteresis loops starting from saturation. A direct current source will normally be provided when the d.c. test method has to be used.

Either of the three methods (a.c. method, d.c. method, capacitor discharge method) may be applied.

2B.2.2 A.C. method

2B.2.2.1 Determination of the magnetizing inductance L_m

A substantially sinusoidal a.c. voltage is applied to the secondary terminals and the corresponding value of the exciting current is measured. The test may be performed at reduced frequency f' to avoid unacceptable voltage stressing of the winding and secondary terminals. Effects of undue eddy current losses in the core and capacitive currents between the winding layers will be less likely to cause false readings at lower frequencies. The result shall be shown as a saturation curve.

The exciting voltage shall be measured with an instrument whose response is proportional to the average of the rectified signal, but calibrated in r.m.s. The exciting current shall be measured using a peak reading instrument.

--`,,`,,`-`-`,,`,,`,`,,`---

The peak value of the secondary linked flux ψ may be derived from the measured r.m.s. value of the applied voltage U at the frequency f' as follows:

$$\hat{\psi} = \frac{\sqrt{2}\,U}{2\pi f'}$$

Accordingly, the saturation voltage U_{sat} corresponds with the saturation flux ψ_{sat} as follows:

$$\hat{\psi}_{sat} = \frac{\sqrt{2}\,U_{sat}}{2\pi f'}$$

NOTE 201 U_{sat} shall be estimated as the voltage value where the curve is practically horizontal. The influence of the uncertainty in the determination of U_{sat} on L_m is practically negligible.

Considering this equation, the curve gives the required relationship between the peak value of the exciting current and the peak value of the secondary linked flux ψ. The magnetizing inductance L_m is defined as the mean slope of this curve between 20 % and 70 % of the saturation flux ψ_{sat}. It is calculated as

$$L_m = \frac{0{,}5 \times U_{sat} \times \sqrt{2}}{(\hat{i}_{70} - \hat{i}_{20}) \times 2\pi f'}$$

where

$\hat{i}_{20}$ is the peak value of the exciting current at 20 % U_{sat};

$\hat{i}_{70}$ is the peak value of the exciting current at 70 % U_{sat}.

NOTE 202 This formula differs slightly from the formula given in the preceding standard IEC 60044-6 (B4) due to the improved definition of saturation.

2B.2.2.2 Determination of the error at limiting conditions

The test arrangement of 2B.2.2.1 shall be used.

The voltage shall be increased up to the voltage equal to E_{al} given as

$$E_{al} = K_{ssc} \times K_{td} \times (R_{ct} + R_b) \times I_{sr}$$

The appropriate exciting current $\hat{I}_{al}$ shall not exceed the following limits:

For classes TPX and TPY: $\hat{I}_{al} \le \sqrt{2} \times I_{sr} \times K_{ssc} \times \hat{\varepsilon}$

For class TPZ: $\hat{I}_{al} \le \sqrt{2} \times I_{sr} \times K_{ssc} \times \left(\frac{K_{td} - 1}{2\pi f_R \times T_S} + \hat{\varepsilon}_{ac} \right)$

NOTE For TPZ current transformers, the accuracy is specified only for the a.c. component while, in the determination of the permissible value of I_{al} during indirect tests, it is also necessary to take the d.c. component of the exciting current into account. In the above equation, the d.c. component is represented by $(K_{td} - 1)$.

2B.2.2.3 Determination of the remanence factor K_R

Other than in 2B.2.2.1 and 2B.2.2.2, the waveforms of the a.c. signals have to be detected.

In determining the remanence factor K_R by the a.c. test method, it is necessary to integrate the exciting voltage according to equation (1) given in 2B.2.1. The integrated voltage with the corresponding current i_e will display a hysteresis loop, showing the saturation flux ψ_{sat}. The secondary linked flux value at zero crossing of current is deemed to represent the remanent flux ψ_r. See Figure 2B.9. The remanence factor K_R is then calculated as

$$K_R = \frac{\psi_r}{\psi_{sat}} \tag{2B.12}$$

At lower frequencies, effects of undue eddy current losses in the core and capacitive currents between the winding layers will be less likely to cause false readings.

NOTE ψ_{sat} shall be estimated as the secondary linked flux value where the curve is practically horizontal.

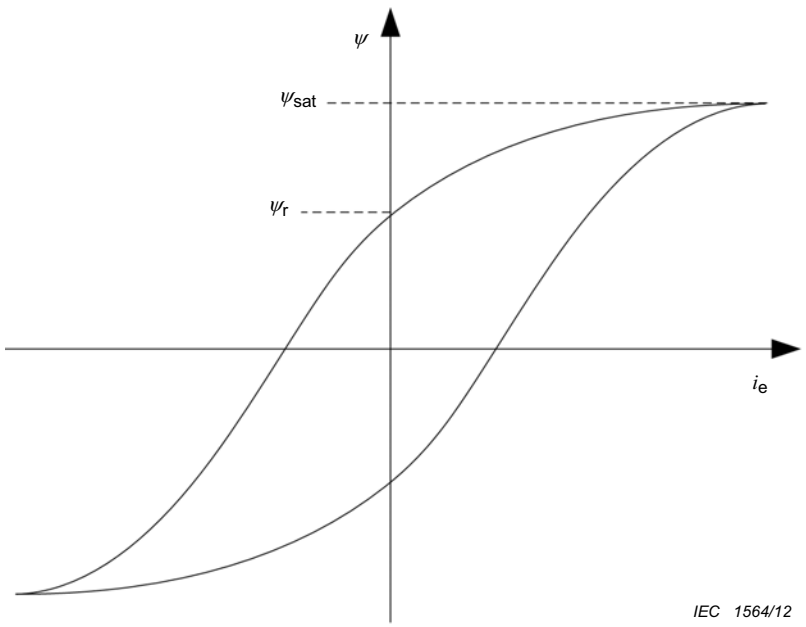


Figure 2B.9 – Determination of remanence factor by hysteresis loop

2B.2.3 D.C. method

2B.2.3.1 General

The d.c. saturation method applies a d.c. voltage u(t) of such duration that saturation flux is reached. The flux measurement is derived according to equation (2B.11) given in 2B.2.1, where u(t) is the voltage across the terminals. See Figure 2B.10.

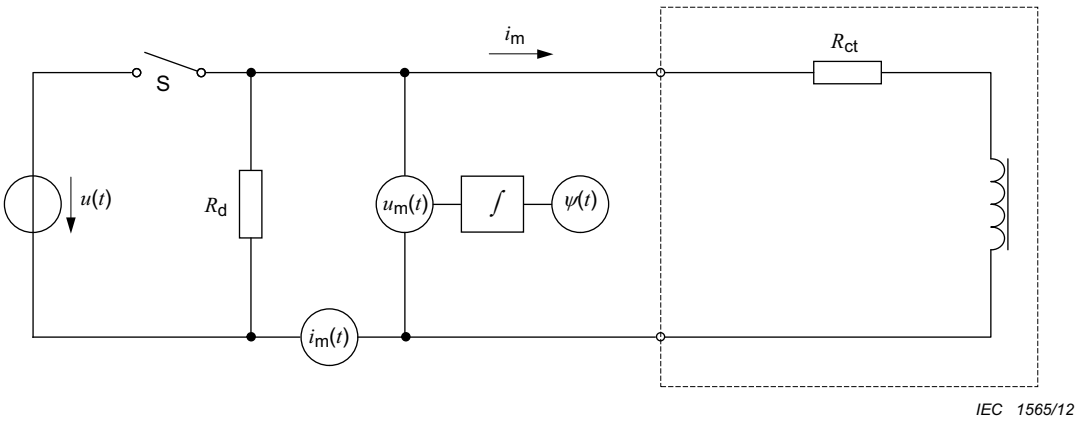


Figure 2B.10 – Circuit for d.c. method

The applied voltage source shall be suitable to drive the current transformer into saturation.

The discharge resistor R_d shall be connected; otherwise the magnetizing inductance of the core may cause very high overvoltage when switch S is opened and the inductive current interrupted.

2B.2.3.2 Determination of the remanence factor K_R

The test circuit according to 2B.2.3.1 shall be used.

Sometime after the switch S has been closed, the magnetizing current will be deemed to have reached its maximum value ($\hat{i}_m$) at which the secondary linked flux would remain constant. Before reaching the constant value, the i_m curve must show a significant increase of the gradient, indicating saturation. The d.c. source shall be able to drive the transformer core into saturation without influencing the test results due to its limitations. This condition is fulfilled if the secondary linked flux achieves a stable value earlier than the magnetizing current.

The rising values of the magnetizing current and of the flux shall be recorded up to the time at which the values become constant, then the switch S will be opened.

Typical test records of the flux ψ and of the magnetizing current i_m are shown in Figure 2B.11.

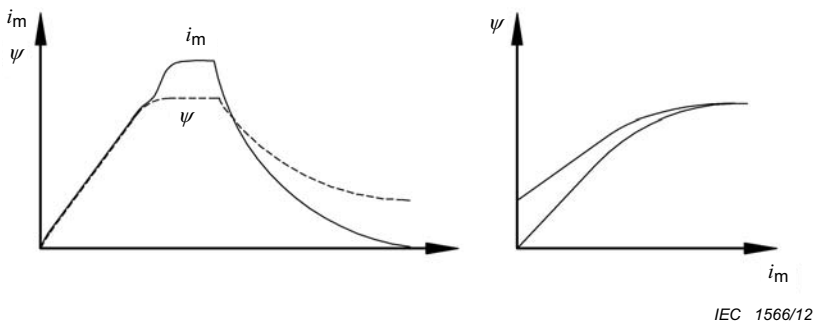


Figure 2B.11 – Time-amplitude and flux-current diagrams

At the opening of switch S, a decreasing current flows through the secondary winding and the discharging resistor R_d . The corresponding flux value decreases, but may not fall to zero.

When a suitable magnetizing current i_m has been chosen to achieve the saturation flux ψ_{sat}, the remaining flux value at the zero current shall be deemed to be the remanent flux ψ_r.

For a current transformer whose core has not been demagnetized before, the saturation flux and the remanent flux may be determined by an additional test in which the secondary terminals have been interchanged. The curve of secondary linked flux obtained hereby contains an offset of half of the apparently measured remanent flux value. Therefore, the zero line has to be shifted correspondingly, leading to corrected values of saturation flux and remanent flux. See figure 2B.12.

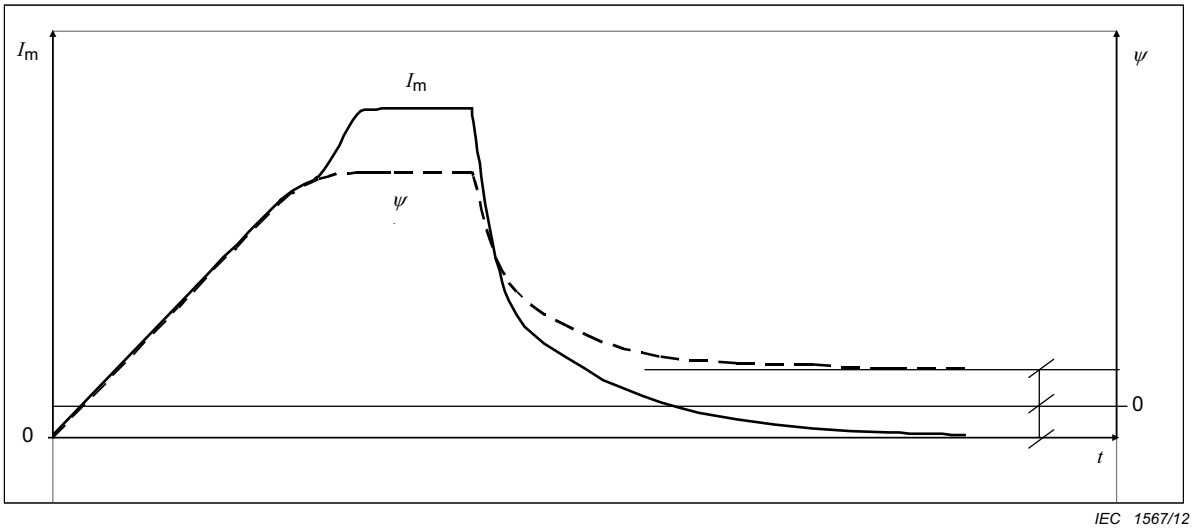


Figure 2B.12 – Recordings with shifted flux base line

The remanence factor K_R is determined

$$K_R = \frac{\psi_r}{\psi_{sat}}$$

2B.2.3.3 Determination of the magnetizing inductance L_m

The test procedure of 2B.2.3.2 shall be used.

The magnetizing inductance (L_m) may be deduced according to the following equation:

$$L_m = \frac{0{,}5 \times \psi_{sat}}{i_{70} - i_{20}}$$

where

i_{20} is the peak value of the magnetizing current at 20 % ψ_{sat};

i_{70} is the peak value of the magnetizing current at 70 % ψ_{sat}.

NOTE This formula differs slightly from the definition given in the preceding standard IEC 60044-6 (B4) due to the improved definition of saturation.

2B.2.3.4 Determination of the error at limiting conditions

The test circuit according to 2B.2.3.1 shall be used.

For determination of the error at limiting conditions, the magnetizing current i_m at the secondary linked flux ψ_{al} shall be measured while increasing the flux.

ψ_{al} is given as

$$\psi_{al} = \frac{\sqrt{2} \times E_{al}}{2\pi f_R} = \frac{\sqrt{2} \times K_{td} \times K_{ssc} \times I_{sr} \times (R_b + R_{ct})}{2\pi f_R}$$

The magnetizing current i_m shall not exceed the following limits:

For classes TPX and TPY: $i_m \leq \sqrt{2} \times I_{sr} \times K_{ssc} \times \hat{\varepsilon}$

For class TPZ: $i_m \leq \sqrt{2} \times I_{sr} \times K_{ssc} \times \left(\frac{K_{td} - 1}{2\pi f_R \times T_S} + \hat{\varepsilon}_{ac} \right)$

NOTE For TPZ current transformers, the accuracy is specified only for the a.c. component while, in the determination of the permissible value of i_m during indirect tests, it is also necessary to take the d.c. component of the exciting current into account. In the above equation, the d.c. component is represented by $(K_{td} - 1)$.

2B.2.4 Capacitor discharge method

The capacitor discharge method uses the charge of a capacitor for energizing the current transformer core from the secondary. The flux measurement is derived according to equation (1) given in 2B.2.1, where $u(t)$ is the voltage across the terminals. See Figure 2B.13.

The capacitor is charged with a voltage sufficiently high to produce a secondary linked flux equal to or greater than the flux ψ_{al} corresponding to E_{al}. See Figure 2B.13 and Figure 2B.14.

$$\psi_{al} = \frac{\sqrt{2} \times E_{al}}{2\pi f_R}$$

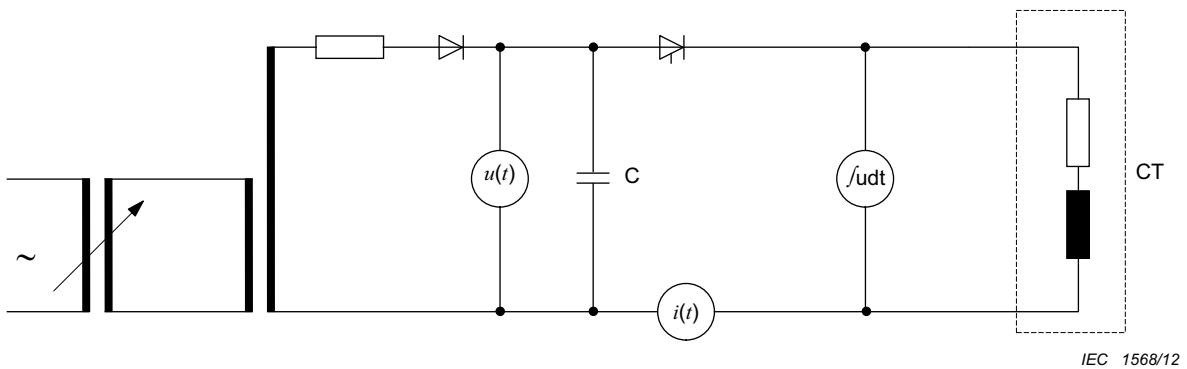


Figure 2B.13 – Circuit for capacitor discharge method

At the time when ψ_{al} is reached, the peak value of the secondary exciting current i_m shall be measured and shall not exceed the peak value of the exciting secondary current $\hat{I}_{al}$.

The secondary time constant T_s shall be determined by applying a voltage with a voltage-time integral corresponding to 90 % of E_{al}. The corresponding exciting current i'_m is measured and the secondary time constant calculated as follows:

$$T_s = \frac{\sqrt{2} \times 0{,}9 \times E_{al}}{2\pi f_R \times (R_{ct} + R_b) \times i'_m}$$

NOTE This definition of T_s does not conform with the definition in the above mentioned d.c. and a.c. methods.

In determining the remanence factor K_R, the integrated voltage with the corresponding current will determine a hysteresis loop. If the exciting current has been such that the saturation flux is reached, the flux value at zero crossing of the current is deemed to represent the remanent flux ψ_r .

The remanence factor K_R is determined:

$$K_R = \frac{\psi_r}{\psi_{sat}}$$

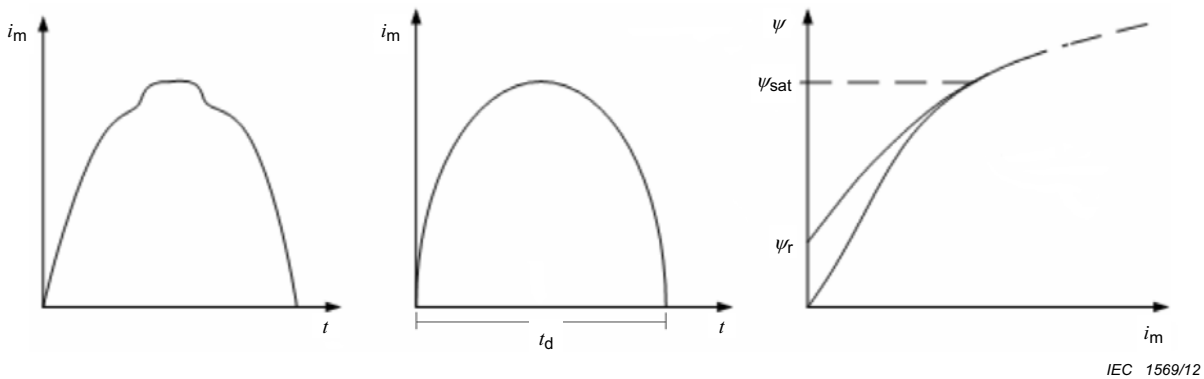


Figure 2B.14 – Typical records for capacitor discharge method

2B.3 Direct test for determination of the error at limiting conditions

2B.3.1 General

The instantaneous error current can be measured in different ways. In all cases, the errors of the measuring system shall not exceed 10 % of the error limit corresponding to the class of the tested current transformer during the whole of the duty cycle.

2B.3.2 Direct test

Class TPX current transformers shall be demagnetized before the direct test because of the high remanence factor. It may be necessary to demagnetize class TPY current transformers if the remanence factor K_R is not negligible.

Two direct tests shall be performed at rated frequency and with rated secondary burden:

a) The rated primary short-circuit current at rated frequency is applied without any offset. The a.c. component of the instantaneous error is measured and shall be in accordance with the theoretical value $1/\omega T_s$.

b) To verify that the current transformer meets the accuracy requirements of the specified duty cycle, the following test shall be performed:

   The rated primary short-circuit current at rated frequency is applied with the required offset. For specified values of primary time constant up to 80 ms, the test is performed in the specified accuracy limiting condition (specified duty cycle). The primary time constant shall not deviate by more than 10 % from the specified value.

For specified values of primary time constant above 80 ms, the tests can be performed in equivalent accuracy limiting conditions (by modifying duty cycle and/or burden), subjected to agreement between manufacturer and purchaser.

During the energization period, the first peak of the primary current shall be not less than the value corresponding to the specified conditions.

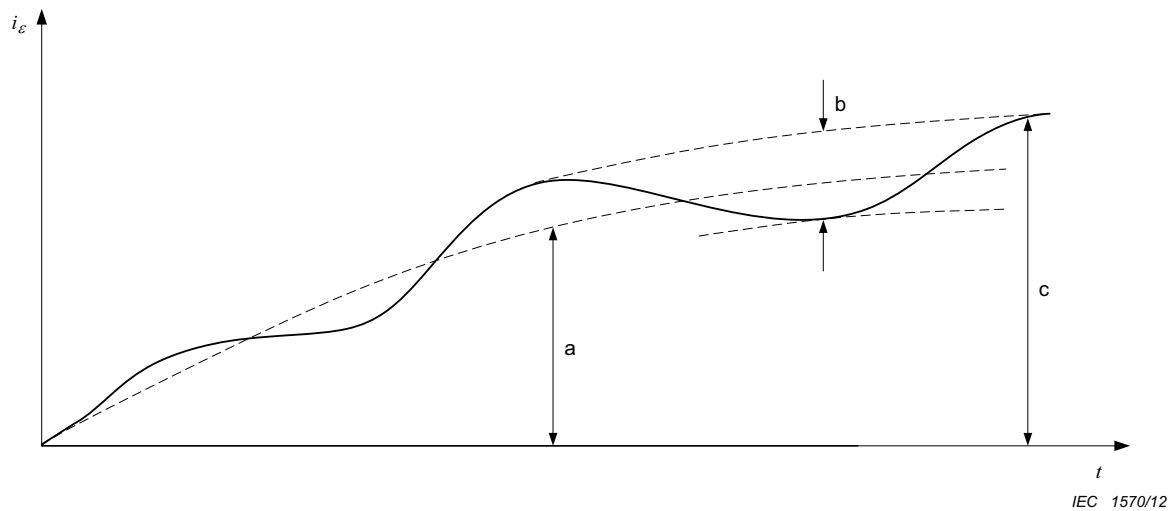
In laboratory practice, it may be difficult to reproduce the exact duty cycle specification. In this case, the calculated K_{td} value of the applied duty cycle shall not be less than the calculated K_{td} value of the specified duty cycle. To meet this requirement, the duration of the energization(s) and/or the secondary burden may be adjusted.

NOTE As the calculation of K_{td} is based on worst-case formulas (formula 6 in 2B.1.2 may deliver K_{td} values which are 30 % higher than necessary), the current transformer may satisfy the duty cycle without reaching the flux corresponding to the calculated K_{td} value.

For class TPX and TPY current transformers, the instantaneous error current i_ε is measured as $i_\varepsilon = i_s \times k_r - i_p$. The error value $\hat{\varepsilon}$ according to 3.4.222 shall be determined. Its value shall not exceed the limit given in Table 206.

For class TPZ current transformers, the a.c. component of the error current is measured as one half of the peak-to-peak value (see Figure 2B.15). The error value $\hat{\varepsilon}_{ac}$ according to 3.4.223 shall be determined. Its value shall not exceed the limit given in Table 206.

NOTE It is possible that the class definition does not contain a duty cycle. In this case, for test purposes, a duty cycle leading to the given K_{td} value shall be agreed between manufacturer and purchaser.



Where:

a= $\hat{i}_{\varepsilon dc}$

b= $2\hat{i}_{\varepsilon ac}$

c= $\hat{i}_{\varepsilon ac} + \hat{i}_{\varepsilon dc}$

for TPY: $\hat{i}_\varepsilon = c$

for TPZ: $\hat{i}_\varepsilon = \hat{i}_{\varepsilon ac} = \frac{b}{2}$

Figure 2B.15 – Measurement of error currents

If the real K_{td} value of the current transformer has to be determined, the duration of the energization and/or secondary burden shall be increased so that the measured instantaneous error current reaches the limiting value for the accuracy class concerned (Table 206). For class TPZ, linear interpolation is used to determine the instant at which the limiting value of the a.c. component of the error current is reached.

The secondary linked flux ψ_{dir} shall be determined as

$$\psi(t) = \frac{R_{ct} + R_b}{R_b} \times \int_0^t R_b \times i_s(t)dt$$

where t is the time point when the error limit $\hat{\varepsilon}$ or $\hat{\varepsilon}_{ac}$ is reached.

The total dimensioning factor K_{td} of the current transformer is the ratio of ψdir to the peak value of the a.c. component of ψ under steady-state conditions. This a.c. component can be derived from a secondary linked flux measurement in the test a), which has to be related to the exact (theoretical) value of the short circuit current K_{ssc} x I_{sr}. The measurement shall be made using the abovementioned formula.

The error in flux measurement shall not exceed 5 %.

2B.3.3 Determination of the factor of construction

If compliance with the requirements of low-leakage reactance design cannot be established to the mutual satisfaction of the manufacturer and purchaser by reference to drawings, then the factor of construction F_c shall be determined as follows:

The secondary linked flux values in both a direct test and an indirect test have to be determined, in both cases for the magnetizing current at accuracy limiting conditions. If a transient performance class is specified by the alternative definition, the appropriate duty cycle and burden shall be chosen in order to achieve the specified K_{ssc} x K_{td} value.

The secondary linked flux ψ_{dir}, which is obtained in the direct test according to 2B.3.2, shall be determined.

In the indirect test, the secondary linked flux $\hat{\psi}_{ind}$ shall be determined with one of the following methods:

a.c. method:

The test arrangement according to 2B.2.2.1 shall be applied.

The voltage shall be increased until the appropriate limit of the exciting current $\hat{I}_{al}$ given in 2B.2.2.2 is reached. The voltage U obtained hereby shall be noted. The secondary linked flux $\hat{\psi}_{ind}$ is given by

$$\hat{\psi}_{ind} = \frac{\sqrt{2} \times U}{2\pi f}$$

where f is the applied frequency.

d.c. or capacitor discharge method:

The test circuit according to 2B.2.3.1 (d.c. method) or 2B.2.4 (capacitor discharge method) shall be used.

The flux $\hat{\psi}_{\text{ind}}$ is the secondary linked flux which corresponds to the limit of the magnetizing current i_{m} given in 2B.2.3.4.

F_{c} is then calculated as $$F_{\text{c}} = \frac{\hat{\psi}_{\text{ind}}}{\hat{\psi}_{\text{dir}}}$$

In the tests, the error in flux measurement shall not exceed 5 %.

If F_{c} is greater than 1,1, it shall be considered when dimensioning the core.

NOTE The value of primary current required to perform direct tests on certain transformer types may be beyond the capability of facilities normally provided by manufacturers. Tests at lower levels of primary current may be agreed between the manufacturer and purchaser.

Annex 2C
(normative)

Proof of low-leakage reactance type

It shall be demonstrated that:

- the current transformer has a substantially continuous ring core, with air gaps uniformly distributed, if any;
- the current transformer has uniformly distributed secondary winding;
- the current transformer has a primary conductor symmetrical with respect to rotation;
- the influences of conductors of the adjacent phase outside of the current transformer housing and of the neighbouring phases are negligible.

If compliance with the requirements of low-leakage reactance design cannot be established to the mutual satisfaction of manufacturer and purchaser by reference to drawings, then the results of a direct test and of an indirect test shall be compared as follows:

For class TPX, TPY and TPZ current transformers, the factor of construction F_C shall be determined according to 2B.3.3. If F_C is less than 1,1, the current transformer shall be regarded as low-leakage reactance current transformer.

For all other protection classes, the composite errors of the full winding obtained with a direct test method and with the indirect test method shall be compared.

For the direct test, either of the methods given in 2A.5 and 2A.6 may be applied. The primary test current shall be:

ALF x I_{pr} for class P and class PR;

K_x x I_{pr} for class PX and class PXR.

For the indirect test, the method given in 7.2.6.203 b) shall be applied. The voltage applied to the secondary terminals shall be equal to:

E_{ALF} for class P and class PR;

E_k for class PX and class PXR.

Proof of low-leakage reactance design shall be considered to have been established if the value of composite error from the direct method is less than 1,1 times that deduced from the indirect method.

NOTE According to its definition (3.4.235), the term “low-leakage reactance current transformer” is not universal, but related to its protection performance, e.g. protection class.

Annex 2D
(informative)

Technique used in temperature rise test of oil-immersed transformers to determine the thermal constant by an experimental estimation

List of symbols:

θ	Temperature in °C
$\theta(t)$	Oil temperature, varying with time (this may be the temperature of the oil at the top, or average oil temperature)
θ_a	External cooling medium temperature (ambient air or water) assumed to be constant
$\Delta\theta$	Oil temperature rise above θ_a
θ_u, $\Delta\theta_u$	Ultimate values in steady state
$\varepsilon(t)$	Remaining deviation from steady-state value θ_u
T_o	Time constant for exponential variation of bulk oil temperature rise
h	Time interval between readings
θ_1, θ_2, θ_3	Three successive temperature readings with time interval h between them.

In principle, the test should continue until the steady-state temperature rise (of the oil) is ascertained.

$$\theta_u = \theta_a + \Delta\theta_u \tag{2D.1}$$

$$\theta(t) = \theta_a + \Delta\theta_u (1 - e^{-t/To}) \tag{2D.2}$$

The remaining deviation from steady state is then:

$$\varepsilon(t) = \theta_u - \theta(t) = \Delta\theta_u \times e^{-t/To} \tag{2D.3}$$

It is considered that:

- the ambient temperature is kept as constant as possible;
- the oil temperature $\theta(t)$ will approach an ultimate value θu along an exponential function with a time constant of T_o;
- the equation (2D.2) is a good approximation of the temperature curve (see Figure 2D.1).

Given three successive readings $\Delta\theta_1$, $\Delta\theta_2$ and $\Delta\theta_3$, the exponential relation of equation (2D.2), is a good approximation of the temperature curve, then the increments will have the following relation:

$$\frac{\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1}{\Delta\theta_3 - \Delta\theta_2} = e^{h/T_o}$$

$$T_o = \frac{h}{\ln\dfrac{\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1}{\Delta\theta_3 - \Delta\theta_2}} \tag{2D.4}$$

The readings also permit a prediction of the final temperature rise:

$$\Delta\theta_u = \frac{(\Delta\theta_2)^2 - \Delta\theta_1\Delta\theta_3}{2\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1 - \Delta\theta_3} \quad (2D.5)$$

Successive estimates are to be made and they should converge. In order to avoid large random numerical errors the time interval h should be approximately T_o and $\Delta\theta_3/\Delta\theta_u$ should be not less than 0,95.

A more accurate value of steady-rate temperature rise is obtained by a least square method of extrapolation of all measured points above approximately 60 % of $\Delta\theta_u$ ($\Delta\theta_u$ estimated by the three point method).

A different numerical formulation is:

$$\Delta\theta_u = \Delta\theta_2 + \frac{\sqrt{(\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1) - (\Delta\theta_3 - \Delta\theta_2)}}{\ln\dfrac{\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1}{\Delta\theta_3 - \Delta\theta_2}} \quad (2D.6)$$

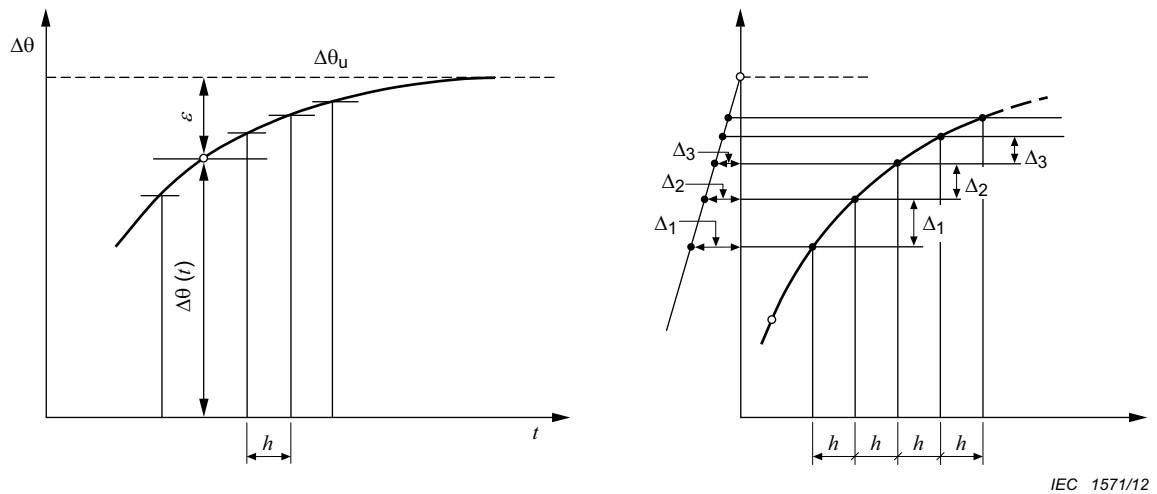


Figure 2D.1 – Graphical extrapolation to ultimate temperature rise

Annex 2E
(informative)

Alternative measurement of the ratio error (ε)

For low-leakage reactance current transformers, the following indirect test will lead to results which are very close to the results obtained in the direct test.

Nevertheless, routine tests for ratio error determination shall always be performed as a direct test, as this method gives the highest evidence of the “low-leakage reactance property” of a core, including magnetic homogeneity of the iron core. On the other hand, the alternative method is suitable for on-site measurements, and for monitoring purposes.

In this case, it shall be noted that this method never considers the influence of current flow in the neighborhood of the current transformer.

For the determination of the ratio error, the simplified equivalent circuit diagram shown in Figure 2E.1 is used:

$$\underline{I}_p \times N_p / N_s = \underline{I}_s + \underline{I}_e$$

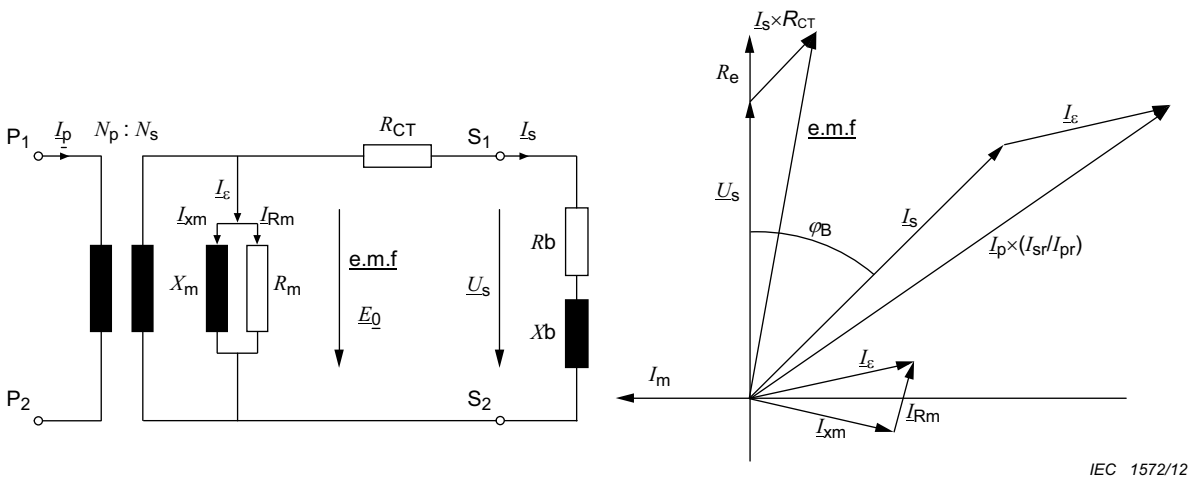


Figure 2E.1 – Simplified equivalent circuit of the current transformer

A substantially sinusoidal voltage is applied to the secondary terminals S_1 – S_2 of the current transformer. The test voltage across the terminals $\underline{U}_{s\ Test}$ and the current $\underline{I}_{s\ Test}$ are measured. The injected voltage should generate an e.m.f. across the main inductivity with the same amplitude as during operation with a certain current and the actual burden. The e.m.f. can be calculated from the test results by subtracting the voltage drop across the winding resistance R_{ct} from the test voltage $U_{s\ Test}$ across the S_1 – S_2 terminals. This subtraction has to be done in the complex plane. The measured current $I_{s\ Test}$ is equal the error current I_ε.

The ratio error can be expressed as:

$$\varepsilon = \frac{\underline{I}_s - \underline{I}_p \dfrac{I_{sr}}{I_{pr}}}{\underline{I}_p \dfrac{I_{sr}}{I_{pr}}} = \frac{\underline{I}_s I_{pr}}{\underline{I}_p I_{sr}} - 1 \qquad (2E.1)$$

with:

$$\frac{\underline{I}_{\mathrm{p}} N_{\mathrm{p}}}{N_{\mathrm{s}}} = \underline{I}_{\mathrm{e}} + \underline{I}_{\mathrm{s}} \Rightarrow \underline{I}_{\mathrm{p}} = \frac{(\underline{I}_{\mathrm{e}} + \underline{I}_{\mathrm{s}}) N_{\mathrm{s}}}{N_{\mathrm{p}}} \tag{2E.2}$$

the ratio error can be expressed as:

$$\varepsilon = \frac{\underline{I}_{\mathrm{s}} \times N_{\mathrm{p}} \times I_{\mathrm{pr}}}{(\underline{I}_{\mathrm{e}} + \underline{I}_{\mathrm{s}}) \times N_{\mathrm{s}} \times I_{\mathrm{sr}}} - 1 \tag{2E.3}$$

To determine the ratio error for a certain secondary current I_{s} the following test procedure is proposed:

- Calculation of the secondary voltage across $S_1 - S_2$:

$$\underline{U}_{\mathrm{s}} = \underline{I}_{\mathrm{s}} \times (R_{\mathrm{b}} + jX_{\mathrm{b}})$$

- Measurement of the secondary winding resistance R (value at the actual temperature)
- Calculation of the corresponding e.m.f.

$$\underline{E}_0 = \underline{I}_{\mathrm{s}} R + \underline{U}_{\mathrm{s}}$$

- Injection of

$$\underline{U}_{\mathrm{s\,Test}} = \underline{E}_0 + \underline{I}_{\mathrm{s\,Test}} R \qquad (\text{with } I_{\mathrm{s\ Test}} = I_{\mathrm{s}})$$

  into the secondary terminals $S_1 - S_2$
- Measurement of the voltage $U_{\mathrm{p\ Test}}$ across P_1 - P_2
- Calculation of the turns ratio

$$\frac{N_{\mathrm{p}}}{N_{\mathrm{s}}} = \frac{U_{\mathrm{p\,Test}}}{|\underline{E}_0|}$$

- Calculation of the corresponding I_{p}

$$\underline{I}_{\mathrm{P}} = \frac{(\underline{I}_{\mathrm{s}} + \underline{I}_{\mathrm{s\,Test}}) N_{\mathrm{s}}}{N_{\mathrm{p}}}$$

  The ratio error can be calculated as:

$$\varepsilon = \frac{\underline{I}_{\mathrm{s}} N_{\mathrm{p}} I_{\mathrm{pr}}}{(\underline{I}_{\mathrm{s\,Test}} + \underline{I}_{\mathrm{s}}) \times I_{\mathrm{sr}}} - 1$$

Annex 2F
(normative)

Determination of the turns ratio error

The actual transformation ratio is affected by errors from three sources:

a) the difference between the inverse of the turns ratio and the rated transformation ratio;

b) the core exciting current (I_e);

c) the currents which flow in the stray capacitances associated with the windings.

In most cases, it is reasonable to assume that for a given secondary winding induced e.m.f. (E_s), the error currents due to stray capacitances and core magnetization will maintain a constant value irrespective of the value of the primary energizing current. E_s can theoretically be maintained at a constant value for a range of energizing currents, provided that the secondary loop impedance can be appropriately adjusted. For current transformers designed to be of the low-leakage reactance type, the secondary leakage reactance can be ignored and only the secondary winding resistance has to be considered. Thus, for any two currents I'_s and I''_s the basic equation defining the test requirement is

given by

$$I'_S (R + R'_b) = E_S = I''_S (R + R''_b)$$

where R is the actual resistance of the secondary winding.

Assuming that the measured ratio errors are ε'_c and ε''_c, the turns ratio error is denoted as ε_t, and the combined magnetization and stray currents are given by I_x. The respective error currents will be given by:

$$(\varepsilon'_c - \varepsilon_t) \times k_r I'_s = I_x = (\varepsilon''_c - \varepsilon_t) \times k_r I''_s$$

whence:

$$\varepsilon_t = \frac{\varepsilon'_c \times I'_s - \varepsilon''_c \times I''_s}{I'_s - I''_s}$$

If $I'_S = 2I''_S$, the turns ratio error is given by $2\,\varepsilon'_c - \varepsilon''_c$.

A test at rated current with minimum secondary connected burden, followed by a test at half rated current and suitable increase in secondary loop resistance, will usually give satisfactory results.

_____

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS 73
1 Domaine d'application 77
2 Références normatives 77
3 Termes et définitions 77
3.1 Définitions générales 77
3.3 Définitions relatives aux caractéristiques assignées de courant 79
3.4 Définitions relatives à la précision 80
3.7 Index des abréviations 88
5 Caractéristiques assignées 90
5.3 Niveaux d'isolement assignés 90
5.3.2 Niveau d'isolement assigné des bornes primaires 90
5.3.5 Exigences d'isolement pour les bornes secondaires 90
5.3.201 Exigences d'isolement entre spires 90
5.5 Puissance de sortie assignée 90
5.5.201 Valeurs de la puissance de sortie assignée 90
5.5.202 Valeurs de charge résistive assignée 90
5.6 Classe de précision assignée 91
5.6.201 Transformateurs de courant pour mesure 91
5.6.202 Transformateurs de courant pour protection 92
5.6.203 Spécification de classe pour les transformateurs de courant à rapports de transformation sélectionnables 97
5.201 Valeurs normales du courant primaire assigné 97
5.202 Valeurs normales du courant secondaire assigné 98
5.203 Valeurs normales du courant thermique permanent assigné 98
5.204 Courants de court-circuit assignés 98
5.204.1 Courant de court-circuit thermique assigné (I_{th}) 98
5.204.2 Courant dynamique assigné (I_{dyn}) 98
6 Conception et construction 98
6.4 Exigences relatives à l'échauffement des parties et des composants 98
6.4.1 Généralités 98
6.13 Marquage 98
6.13.201 Marquage des bornes 98
6.13.202 Marquage des plaques signalétiques 99
7 Essais 102
7.1 Généralités 102
7.1.2 Liste des essais 102
7.2 Essais de type 103
7.2.2 Essai d'échauffement 103
7.2.3 Essai de tenue à la tension de choc sur les bornes primaires 104
7.2.6 Essais concernant la précision 105
7.2.201 Essais de tenue aux courants de courte durée 106
7.3 Essais individuels de série 107
7.3.1 Essais de tenue à la tension à fréquence industrielle sur les bornes primaires 107
7.3.5 Essais concernant la précision 107
7.3.201 Détermination de la résistance de l'enroulement secondaire (R_{ct}) 109

7.3.202 Détermination de la constante de temps de la boucle secondaire (T_s) 109
7.3.203 Essai pour la force électromotrice de coude assignée (E_k) et le courant d'excitation à E_k 110
7.3.204 Essai de surtension entre spires 111
7.4 Essais spéciaux 112
7.4.3 Mesure de la capacité et du facteur de dissipation diélectrique 112
7.4.6 Essai de défaut d'arc interne 112
7.5 Essais sur prélèvements 112
7.5.1 Détermination du facteur de rémanence 112
7.5.2 Détermination du facteur de sécurité (FS) pour les transformateurs de courant pour mesure 112
Annexe 2A (normative) Transformateurs de courant pour protection de classes P et PR 113
Annexe 2B (normative) Classes de transformateurs de courant pour protection pour réponse en régime transitoire 118
Annexe 2C (normative) Preuve de type à faible réactance de fuite 135
Annexe 2D (informative) Technique utilisée dans l'essai d'échauffement des transformateurs immergés dans l'huile pour déterminer la constante thermique par estimation expérimentale 136
Annexe 2E (informative) Méthode alternative pour la mesure de l'erreur de rapport (ε) 138
Annexe 2F (normative) Détermination du rapport des nombres de spires 140

Figure 201 – Cycles de fonctionnement 85
Figure 202 – Constante de temps du primaire T_p 85
Figure 203 – Flux embrassé par l'enroulement secondaire pour des différents angles d'apparition γ du courant de court-circuit 87
Figure 2A.1 – Diagramme vectoriel 113
Figure 2A.2 – Triangle d'erreur 114
Figure 2A.3 – Forme d'onde typique 115
Figure 2A.4 – Circuit de base pour transformateur de courant 1: 1 115
Figure 2A.5 – Circuit de base pour transformateur de rapport quelconque 116
Figure 2A.6 – Variante de circuit d'essai 116
Figure 2B.1 – Courants de court-circuit présentant la crête la plus élevée (γ = 90°) et présentant une asymétrie inférieure (γ = 140°) 119
Figure 2B.2 – La courbe $\psi_{max}(t)$, composée des valeurs de flux les plus élevées, considérant tous les angles d'enclenchement γ appréciables 119
Figure 2B.3 – Plages de temps appropriées pour le calcul du facteur transitoire 120
Figure 2B.4 – Détermination de K_{tf} pour la plage 1 à 50 Hz et T_s = 1,8 s 121
Figure 2B.5 – Détermination de K_{tf} pour la plage 1 à 60 Hz et T_s = 1,5 s 121
Figure 2B.6 – Détermination de K_{tf} pour la plage 1 à 16,7 Hz et T_s = 5.5 s 122
Figure 2B.7 – Limitation du flux magnétique considérant la saturation du noyau 123
Figure 2B.8 – Circuit de base 124
Figure 2B.9 – Détermination du facteur de rémanence par cycle d'hystérésis 127
Figure 2B.10 – Circuit pour la méthode en courant continu 127
Figure 2B.11 – Diagrammes temps-amplitude et flux-courrant 128
Figure 2B.12 – Diagramme avec la ligne de zéro déplacée 129

Figure 2B.13 – Circuit utilisé dans la méthode par décharge d'un condensateur 130
Figure 2B.14 – Enregistrements types de la méthode par décharge d'un condensateur 131
Figure 2B.15 – Mesure des courants d'erreur 133
Figure 2D.1 – Extrapolation graphique de l'échauffement final 137
Figure 2E.1 – Circuit équivalent simplifié du transformateur de courant 138

Tableau 201 – Limites de l'erreur de rapport et du déphasage des transformateurs de courant pour mesure (classes de 0,1 à 1) 91
Tableau 202 – Limites de l'erreur de rapport (ε) et du déphasage des transformateurs de courant pour mesure pour applications particulières 92
Tableau 203 – Limites de l'erreur de rapport des transformateurs de courant pour mesure (classes 3 et 5) 92
Tableau 204 – Caractéristiques des classes de protection 93
Tableau 205 – Limites d'erreur des transformateurs de courant pour protection des classes P et PR 94
Tableau 206 – Limites d'erreur pour les transformateurs de courant de classes TPX, TPY et TPZ 96
Tableau 207 – Méthodes de spécification des transformateurs de courant de classes TPX, TPY et TPZ 97
Tableau 208 – Marquage des bornes 99
Tableau 10 – Liste des essais 102

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

_____

TRANSFORMATEURS DE MESURE –

Partie 2: Exigences supplémentaires concernant les transformateurs de courant

AVANT-PROPOS

1) La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, la CEI – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés «Publication(s) de la CEI»). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec la CEI, participent également aux travaux. La CEI collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
2) Les décisions ou accords officiels de la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de la CEI intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
3) Les Publications de la CEI se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de la CEI. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que la CEI s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; la CEI ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de la CEI dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de la CEI et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
5) La CEI elle-même n'accorde aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants proposent des services d'évaluation de conformité et, dans certains domaines, un accès aux marques de conformité de la CEI. La CEI n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
6) Il convient que tous les utilisateurs s'assurent qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à la CEI, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de la CEI, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de la CEI ou de toute autre Publication de la CEI, ou au crédit qui lui est accordé.
8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation des publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de la CEI peuvent faire l'objet de droits de brevet. La CEI ne doit pas être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

Cette Norme Internationale CEI 61869-2 Ed. 1.0 a été établie par le comité 38: Transformateurs de mesure.

La présente première édition de la CEI 61869-2 annule et remplace la première édition de la CEI 60044-1, publiée en 1996, et son Amendement 1 (2000) et Amendement 2 (2002), et la première édition de la CEI 60044-6 (1992). De plus, elle introduit des innovations techniques dans la normalisation et l'adaptation des exigences des transformateurs de courant pour réponse en régime transitoire.

Le texte de la présente norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
38/435/FDIS	38/437/RVD

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette norme.

La présente publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 2.

Une liste de toutes les parties de la série CEI 61869, publiées sous le titre général *Transformateurs de mesure*, peut être consultée sur le site web de la CEI.

La présente Partie 2 doit être utilisée conjointement avec la CEI 61869-1:2007, *Exigences générales*, sur laquelle elle est basée. Le lecteur est toutefois encouragé à utiliser l'édition la plus récente de la norme.

Cette Partie 2 suit la structure de la CEI 61869-1:2007 et complète ou modifie ses articles correspondants.

Lorsqu'un article/paragraphe particulier de la Partie 1 n'est pas mentionné dans cette Partie 2, cet article/paragraphe s'applique. Lorsque la présente norme indique un «complément», une «modification» ou un «remplacement», le texte correspondant de la Partie 1 doit être adapté en conséquence.

Pour les articles, paragraphes, figures, tableaux, annexes ou notes supplémentaires, le système de numérotation suivant est utilisé:

– les articles, paragraphes, tableaux, figures et notes numérotés à partir de 201 s'ajoutent à ceux de la Partie 1;
– les annexes supplémentaires sont désignées 2A, 2B, etc.

Une vue globale de l'ensemble planifié de normes à la date de publication du présent document est indiquée ci-dessous. La liste à jour des normes publiées par le TC 38 de la CEI est disponible sur le site Web: www.iec.ch.

NORMES DE FAMILLES DE PRODUITS		NORME DE PRODUITS	PRODUITS	ANCIENNE NORME
61869-1:2007 EXIGENCES GENERALES CONCERNANT LES TRANSFORMA-TEURS DE MESURE		**61869-2**	EXIGENCES SUPPLEMENTAIRES CONCERNANT LES TRANSFORMATEURS DE COURANT	60044-1 60044-6
		61869-3	EXIGENCES SUPPLEMENTAIRES CONCERNANT LES TRANSFORMATEURS INDUCTIFS DE TENSION	60044-2
		61869-4	EXIGENCES SUPPLEMENTAIRES CONCERNANT LES TRANSFORMATEURS COMBINES	60044-3
		61869-5	EXIGENCES SUPPLEMENTAIRES CONCERNANT LES TRANSFORMATEURS CONDENSATEURS DE TENSION	60044-5
	61869-6 EXIGENCES GÉNÉRALES ADDITIONNELLES POUR LES TRANSFORMA-TEURS DE MESURE ÉLECTRONIQUES ET POUR LES CAPTEURS BAS NIVEAUX	**61869-7**	EXIGENCES SUPPLEMENTAIRES CONCERNANT LES TRANSFORMATEURS DE TENSION ELECTRONIQUES	60044-7
		61869-8	EXIGENCES SUPPLEMENTAIRES CONCERNANT LES TRANSFORMATEURS DE COURANT ELECTRONIQUES	60044-8
		61869-9	INTERFACE NUMERIQUE POUR LES TRANSFORMATEURS DE MESURE	
		61869-10	EXIGENCES SUPPLEMENTAIRES CONCERNANT LES CAPTEURS DE COURANT AUTONOMES DE FAIBLE PUISSANCE	
		61869-11	EXIGENCES SUPPLEMENTAIRES CONCERNANT LES CAPTEURS DE TENSION AUTONOMES DE FAIBLE PUISSANCE	60044-7
		61869-12	EXIGENCES SUPPLEMENTAIRES CONCERNANT LES TRANSFORMATEURS DE MESURE ÉLECTRONIQUES COMBINÉS OU LES CAPTEURS AUTONOMES COMBINÉS	
		61869-13	UNITÉ D'INTERFACE NUMÉRIQUE INDEPENDANTE	

Depuis la publication de la Norme internationale CEI 60044-6 (*Prescriptions concernant les transformateurs de courant pour protection pour la réponse en régime transitoire*) en 1992, le domaine d'application de ce type de transformateurs de courant s'est développé. De ce fait, le contexte théorique du dimensionnement selon les exigences électriques est devenu bien plus complexe. Pour des raisons de lisibilité de la présente norme, l'explication du contexte sera effectuée dans le Rapport technique CEI 61869-100 TR, qui est en cours de rédaction.

--`,,`,,`-`-`,,`,,`,`,,`---

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de la CEI sous http://webstore.iec.ch dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

TRANSFORMATEURS DE MESURE –

Partie 2: Exigences supplémentaires concernant les transformateurs de courant

1 Domaine d'application

La présente Norme internationale s'applique aux transformateurs inductifs de courant fabriqués récemment et destinés à être utilisés avec des appareils de mesure électriques et/ou des dispositifs électriques de protection présentant une fréquence assignée comprise entre 15 Hz et 100 Hz.

2 Références normatives

L'Article 2 de la CEI 61869-1:2007 s'applique, avec les compléments suivants:

CEI 61869-1:2007, *Transformateurs de mesure – Partie 1: Exigences générales.*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions fournis dans la CEI 61869-1:2007 s'appliquent conjointement avec les ajouts suivants:

3.1 Définitions générales

3.1.201
transformateur de courant
transformateur de mesure dans lequel le courant secondaire est, dans les conditions normales d'emploi, pratiquement proportionnel au courant primaire et déphasé par rapport à celui-ci d'un angle voisin de zéro, pour un sens approprié des connexions

[SOURCE: CEI 60050-321:1986, 321-02-01]

3.1.202
transformateur de courant pour mesure
transformateur de courant destiné à transmettre un signal d'information à des appareils de mesure ou à des compteurs

[SOURCE: CEI 60050-321:1986, 321-02-18]

3.1.203
transformateur de courant pour protection
transformateur de courant destiné à transmettre un signal d'information à des dispositifs de protection ou de commande

[SOURCE: CEI 60050-321:1986, 321-02-19)

3.1.204
transformateur de courant pour protection de classe P
transformateur de courant pour protection sans limite de flux rémanent, pour lequel est spécifié un comportement de saturation en cas de court-circuit symétrique

3.1.205
transformateur de courant pour protection de classe PR
transformateur de courant pour protection avec limite de flux rémanent, pour lequel est spécifié un comportement de saturation en cas de court-circuit symétrique

3.1.206
transformateur de courant pour protection de classe PX
transformateur de courant pour protection à faible réactance de fuite sans limite de flux rémanent, pour lequel la connaissance de la caractéristique d'excitation, et de la résistance de l'enroulement secondaire, de la résistance de charge secondaire et du rapport des nombres de spires est suffisante pour évaluer ses performances dans le système de relais de protection auquel il est connecté

3.1.207
transformateur de courant pour protection de classe PXR
transformateur de courant pour protection avec limite de flux rémanent, pour lequel la connaissance de la caractéristique d'excitation, et de la résistance de l'enroulement secondaire, de la résistance de charge secondaire et du rapport des nombres de spires est suffisante pour évaluer ses performances dans le système de relais de protection auquel il est connecté

Note 1 à l'article: On relève de plus en plus de cas où de faibles courants continus traversent constamment les transformateurs de courant. Pour éviter toute saturation, il est recommandé d'utiliser des transformateurs de courant à entrefers, qui offrent les mêmes performances que les transformateurs de courant de classe PX.

Note 2à l'article: Les entrefers pour la réduction de la rémanence ne conduisent pas forcément à créer un transformateur de courant à forte réactance de fuite (voir Annexe 2C)

3.1.208
transformateur de courant pour protection de classe TPX pour réponse en régime transitoire
transformateur de courant pour protection sans limite de flux rémanent, pour lequel le comportement en cas de saturation au cours d'un court-circuit transitoire est spécifié par la valeur de crête de l'erreur instantanée

3.1.209
transformateur de courant pour protection de classe TPY pour réponse en régime transitoire
transformateur de courant pour protection avec limite de flux rémanent, pour lequel le comportement en cas de saturation au cours d'un court-circuit transitoire est spécifié par la valeur de crête de l'erreur instantanée

3.1.210
transformateur de courant pour protection de classe TPZ pour réponse en régime transitoire
transformateur de courant pour protection avec une constante de temps secondaire spécifée, pour lequel le comportement en cas de saturation au cours d'un court-circuit transitoire est spécifié par la valeur de crête de la composante alternative de l'erreur

3.1.211
transformateur de courant à rapport de transformation sélectionnable
transformateur de courant qui permet d'obtenir plusieurs rapports de transformation en reconnectant des sections de l'enroulement primaire ou au moyen de prises sur l'enroulement secondaire

3.3 Définitions relatives aux caractéristiques assignées de courant

3.3.201
courant primaire assigné
I_{pr}
valeur du courant primaire d'après laquelle sont déterminées les caractéristiques de fonctionnement d'un transformateur

[SOURCE: CEI 60050-321:1986, 321-01-11, titre, synonyme et définition modifiés]

3.3.202
courant secondaire assigné
I_{sr}
valeur du courant secondaire d'après laquelle sont déterminées les caractéristiques de fonctionnement d'un transformateur

[SOURCE: CEI 60050-321:1986, 321-01-15, titre, synonyme et définition modifiés]

3.3.203
courant de court-circuit thermique assigné
I_{th}
valeur maximale du courant primaire qu'un transformateur supporte sans subir de dommages pendant une courte durée spécifiée, le secondaire étant mis en court-circuit

[SOURCE: CEI 60050-321:1986, 321-02-22]

3.3.204
courant dynamique assigné
I_{dyn}
valeur de crête maximale du courant primaire qu'un transformateur supporte sans subir de dommages électriques ni mécaniques du fait des efforts électromagnétiques qui en résultent, le secondaire étant mis en court-circuit

[SOURCE: CEI 60050-321:1986, 321-02-24]

3.3.205
courant thermique permanent assigné
I_{cth}
valeur du courant qui peut circuler indéfiniment dans l'enroulement primaire, l'enroulement secondaire étant connecté à la charge assignée, sans que l'échauffement dépasse les limites spécifiées

[SOURCE: CEI 60050-321:1986, 321-02-25]

3.3.206
courant primaire de court-circuit assigné
I_{psc}
valeur efficace de la composante alternative d'un court-circuit transitoire sur laquelle est basée la performance de précision assignée d'un transformateur de courant

Note 1 à l'article: Bien que I_{th} soit lié à la limite thermique, la valeur I_{psc} est relative à la limite de précision. Généralement, I_{psc} est plus petit que I_{th}.

3.3.207
courant d'excitation
I_e
valeur efficace du courant qui traverse l'enroulement secondaire d'un transformateur de courant lorsqu'on applique entre les bornes secondaires une tension sinusoïdale de fréquence assignée, l'enroulement primaire et tous les autres enroulements étant en circuit ouvert

[SOURCE: CEI 60050-321:1986, 321-02-32]

3.4 Définitions relatives à la précision

3.4.3
erreur de rapport
ε
La définition 3.4.3 de la CEI 61869-1:2007 s'applique, avec la note suivante:

Note 201 à l'article: L'erreur de rapport de courant, exprimée en pourcentage, est donnée par la formule:

$$\varepsilon = \frac{k_r I_s - I_p}{I_p} \times 100\ \%$$

où

k_r est le rapport de transformation assigné;
I_p est le courant primaire réel;
I_s est le courant secondaire correspondant à I_p dans les conditions de la mesure.

Un diagramme vectoriel explicatif est donné dans l'Annexe 2A.1

3.4.4
déphasage
$\Delta\varphi$
La définition 3.4.3 de la CEI 61869-1:2007 s'applique, avec la note suivante:

Note 1 à l'article: Un diagramme vectoriel explicatif est donné dans l'Annexe 2A.1.

3.4.201
charge résistive assignée
R_b
valeur assignée de la charge résistive connectée au secondaire, exprimée en ohms

3.4.202
résistance de l'enroulement secondaire
R_{ct}
résistance réelle en courant continu de l'enroulement secondaire, exprimée en ohms, ramenée à 75 °C ou à toute autre température qui peut être spécifiée

Note 1 à l'article: R_{ct} est une valeur réelle. Elle ne doit pas être confondue avec la limite supérieure de R_{ct}, qu'il est possible de spécifier.

3.4.203
erreur composée
ε_c
en régime permanent, la valeur efficace de la différence entre:

a) les valeurs instantanées du courant primaire, et

b) le produit du rapport de transformation assigné par les valeurs instantanées du courant secondaire,

les sens positifs des courants primaire et secondaire correspondant aux conventions admises pour le marquage des bornes

Note 1 à l'article: L'erreur composée ε_c est exprimée en général en pourcent de la valeur efficace du courant selon la formule suivante:

$$\varepsilon_{\mathrm{c}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T (k_{\mathrm{r}} i_{\mathrm{s}} - i_{\mathrm{p}})^2 \,\mathrm{d}t}}{I_{\mathrm{p}}} \times 100\ \%$$

où

k_{r} est le rapport de transformation assigné;
I_{p} est la valeur efficace du courant primaire;
i_{p} est la valeur instantanée du courant primaire;
i_{s} est la valeur instantanée du courant secondaire;
T est la valeur de la période des courants.

Pour plus d'informations, se référer à l'Annexe 2A.4.

[SOURCE: CEI 60050-321:1986, 321-02-26, note à l'article modifié]

3.4.204
courant limite primaire **assigné**
$\boldsymbol{I_{\mathrm{PL}}}$
valeur du courant primaire minimum pour lequel l'erreur composée du transformateur de courant pour mesures est égale ou supérieure à 10%, la charge secondaire étant égale à la charge de précision

[SOURCE: CEI 60050-321:1986, 321-02-27]

3.4.205
facteur de sécurité
$\boldsymbol{FS}$
rapport entre le courant limite primaire assigné et le courant primaire assigné

Note 1 à l'article: Il convient de prêter attention au fait que le facteur de sécurité réel pour les appareils est affecté par la charge. Lorsque la valeur de la charge est significativement inférieure à la valeur assignée, des valeurs de courant plus élevées sont produites côté secondaire en cas de courant de court-circuit.

Note 2 à l'article: Dans le cas où des courants de défaut du système circulent dans l'enroulement primaire d'un transformateur de courant, la sécurité des appareils alimentés par le transformateur est à son maximum lorsque le facteur de sécurité (FS) est à son minimum.

[SOURCE: CEI 60050-321:1986, 321-02-28, notes à l'article modifiés]

3.4.206
force électromotrice limite secondaire
$\boldsymbol{E_{\mathrm{FS}}}$
produit du facteur de sécurité par le courant secondaire assigné et par la somme vectorielle de la charge de précision et de l'impédance de l'enroulement secondaire

Note 1 à l'article: La force électromotrice limite secondaire pour les transformateurs de courant pour mesure E_{FS} se calcule comme suit:

$$E_{\mathrm{FS}} = FS \times I_{sr} \times \sqrt{(R_{ct} + R_b)^2 + X_b^2}$$

où: R_{b} est le part résistive de la charge assignée;

X_{b} est le part inductive de la charge assignée.

La méthode de calcul de la force électromotrice limite secondaire donne une valeur supérieure à la valeur réelle. Elle a été choisie en vue d'appliquer la même méthode d'essai que pour les transformateurs de courant pour protection. Se référer aux paragraphes 7.2.6.202 et 7.2.6.203.

[SOURCE: CEI 60050-321:1986, 321-02-31, note à l'article modifié]

3.4.207
courant limite de précision assigné
valeur la plus élevée du courant primaire pour laquelle le transformateur de courant doit satisfaire aux prescriptions concernant l'erreur composée

[SOURCE: CEI 60050-321:1986, 321-02-29]

3.4.208
facteur limite de précision
ALF
rapport entre le courant limite de précision assigné et le courant primaire assigné

[SOURCE: CEI 60050-321:1986, 321-02-30]

3.4.209
force électromotrice limite secondaire pour les transformateurs de courant pour protection
$E_{\mathbf{ALF}}$
produit du facteur limite de précision par le courant secondaire assigné et par la somme vectorielle de la charge assignée et de l'impédance de l'enroulement secondaire

Note 1 à l'article: La force électromotrice limite secondaire E_{ALF} pour les transformateurs de courant pour protection de classe P et PR se calcule comme suit:

$$E_{\mathrm{ALF}} = ALF \times I_{sr} \times \sqrt{(R_{ct} + R_b)^2 + X_b^2}$$

où: R_{b} est le part résistive de la charge assignée;

X_{b} est le part inductive de la charge assignée.

3.4.210
flux de saturation
$\boldsymbol{\Psi_{sat}}$
valeur maximale du flux embrassé par l'enroulement secondaire d'un transformateur de courant qui correspond à la saturation magnétique du matériau du noyau

Note 1 à l'article: La procédure la plus appropriée pour déterminer le flux de saturation Ψ_{sat} est donnée par la méthode de saturation en courant continu décrite à l'Annexe 2B.2.3 .

Note 2 à l'article: Dans l'ancienne norme CEI 60044-6, Ψ_{s} était défini comme valeur du coude de saturation, qui caractérisait la transition de l'état non-saturé à l'état saturé du noyau. Cette définition n'a pas été bien acceptée car la valeur de saturation était trop basse, ce qui entraînait des confusions. En conséquence, la définition est remplacée par Ψ_{sat}, qui définit la condition de saturation complète.

3.4.211
flux rémanent
$\boldsymbol{\Psi_r}$
valeur du flux embrassé par l'enroulement secondaire qui subsisterait dans le circuit magnétique, 3 min après l'interruption d'un courant d'excitation de grandeur suffisante pour produire le flux de saturation (Ψ_{sat})

3.4.212
facteur de rémanence
$\boldsymbol{K_R}$
Rapport du flux rémanent sur le flux de saturation, exprimé en pourcentage

3.4.213
constante de temps assignée de la boucle secondaire
T_s
valeur de la constante de temps de la boucle secondaire du transformateur de courant, déterminée par le rapport de la somme (L_s) des inductances de magnétisation et de fuite à la résistance totale (R_s) de la boucle secondaire

$$T_s = L_s / R_s$$

3.4.214
caractéristique d'excitation
présentation, sous forme de graphique ou de tableau, de la relation entre la valeur efficace du courant d'excitation et la tension sinusoïdale appliquée aux bornes secondaires d'un transformateur de courant, le primaire et les autres enroulements étant en circuit ouvert, sur une plage de valeurs permettant de définir la caractéristique depuis les bas niveaux d'excitation jusqu'à 1,1 fois la force électromotrice de coude

3.4.215
tension du point de coude
valeur efficace de la tension sinusoïdale à la fréquence assignée qui, appliquée aux bornes secondaires du transformateur, tous les autres enroulements étant à circuit ouvert, provoque une augmentation du courant d'excitation de 50% lorsqu'elle augmente de 10%

[SOURCE: CEI 60050-321: 1986, 321-02-34]

3.4.216
force électromotrice du point de coude
force électromotrice d'un transformateur de courant à la fréquence assignée, telle que son augmentation de 10 % entraîne une augmentation de 50 % de la valeur efficace du courant d'excitation

Note 1 à l'article: Alors que la tension du point de coude peut être appliquée aux bornes secondaires du transformateur de courant, la force électromotrice du point de coude n'est pas accessible directement. La tension du point de coude et la force électromotrice de coude sont considérées comme identiques, par le fait que la chute de tension liée à la résistance de l'enroulement secondaire peut être considérée comme négligeable.

3.4.217
force électromotrice de coude assignée
E_k
limite inférieure de la force électromotrice de coude

Note 1 à l'article: La force électromotrice de coude figure sur la spécification des classes de protection PX et PXR. Elle peut être calculée comme suit:

$$E_k = K_x \times (R_{ct} + R_b) \times I_{sr}$$

3.4.218
rapport des nombres de spires assigné
rapport spécifié entre le nombre de spires de l'enroulement primaire et le nombre de spires de l'enroulement secondaire

EXEMPLE 1 1/600 (signification: 1 spire primaire avec 600 spires secondaires)

EXEMPLE 2 2/1200 (signification: 2 spires primaires avec 1 200 spires secondaires)

Note 1 à l'article: Le rapport des nombres de spires assigné est donné pour un transformateur de courant pour protection de classe PX ou PXR.

Note 2 à l'article: Le rapport des nombres de spires assigné et le rapport de transformation assigné sont définis comme des entités du primaire au secondaire. Pour les comparer, la valeur du rapport des nombres de spires assigné doit être inversée.

3.4.219
erreur sur le rapport des nombres de spires
différence entre les valeurs réelle et assignée du rapport des nombres de spires exprimée en pourcentage du rapport des nombres de spires assigné

3.4.220
facteur de dimensionnement
K_x
facteur indiquant le multiple du courant secondaire assigné (I_{sr}) apparaissant lors de conditions de défaut au primaire, compte tenu des marges de sécurité, et jusqu'auquel le transformateur doit satisfaire aux performances exigées

Note 1 à l'article: Voir la formule sous 3.4.217.

3.4.221
courant d'erreur instantané
i_ε
différence entre les valeurs instantanées du courant secondaire (i_s) multiplié par le rapport de transformation assigné (k_r) et du courant primaire (i_p):

$$i_\varepsilon = k_r \times i_s - i_p$$

Note 1 à l'article: Lorsque le courant comporte deux composantes, l'une alternative (i_{sac}, i_{pac}) et l'autre continue (i_{sdc}, i_{pdc}), ces composantes ($i_{\varepsilon ac}$, $i_{\varepsilon dc}$) sont identifiées séparément comme suit:

$$i_\varepsilon = i_{\varepsilon ac} + i_{\varepsilon dc} = (k_r \times i_{sac} - i_{pac}) + (k_r \times i_{sdc} - i_{pdc})$$

3.4.222
valeur de crête de l'erreur instantanée
$\hat{\varepsilon}$
valeur maximale ($\hat{i}_\varepsilon$) du courant d'erreur instantané (voir 3.4.221) pour le cycle de fonctionnement spécifié, exprimée en pourcentage de la valeur de crête du courant primaire de court-circuit assigné:

$$\hat{\varepsilon} = \frac{\hat{i}_\varepsilon}{\sqrt{2} \times I_{psc}} \times 100\,\%$$

3.4.223
valeur de crête de la composante alternative de l'erreur
$\hat{\varepsilon}_{ac}$
valeur maximale $\hat{i}_{\varepsilon ac}$ de la composante alternative du courant d'erreur instantané (voir 3.4.221) exprimée en pourcentage de la valeur de crête du courant primaire de court-circuit assigné:

$$\hat{\varepsilon}_{ac} = \frac{\hat{i}_{\varepsilon ac}}{\sqrt{2} \times I_{psc}} \times 100\,\%$$

3.4.224
cycle de fonctionnement spécifié (C-O et/ou C-O-C-O)
cycle de fonctionnement pendant lequel, pour chaque excitation spécifiée, on considère que le courant de court-circuit primaire résulte de l'angle d'apparition le plus défavorable (voir Figure 201)

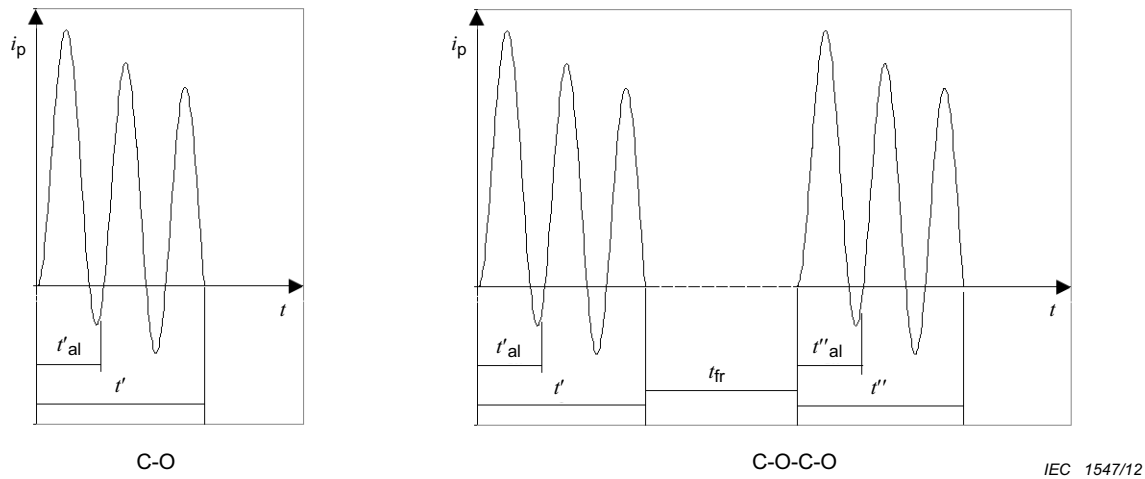


Figure 201 – Cycles de fonctionnement

3.4.225
constante de temps du primaire spécifiée
T_P
valeur spécifiée de la constante de temps de la composante continue du courant primaire de court-circuit sur laquelle est basée la réponse du transformateur de courant en régime transitoire (voir Figure 202)

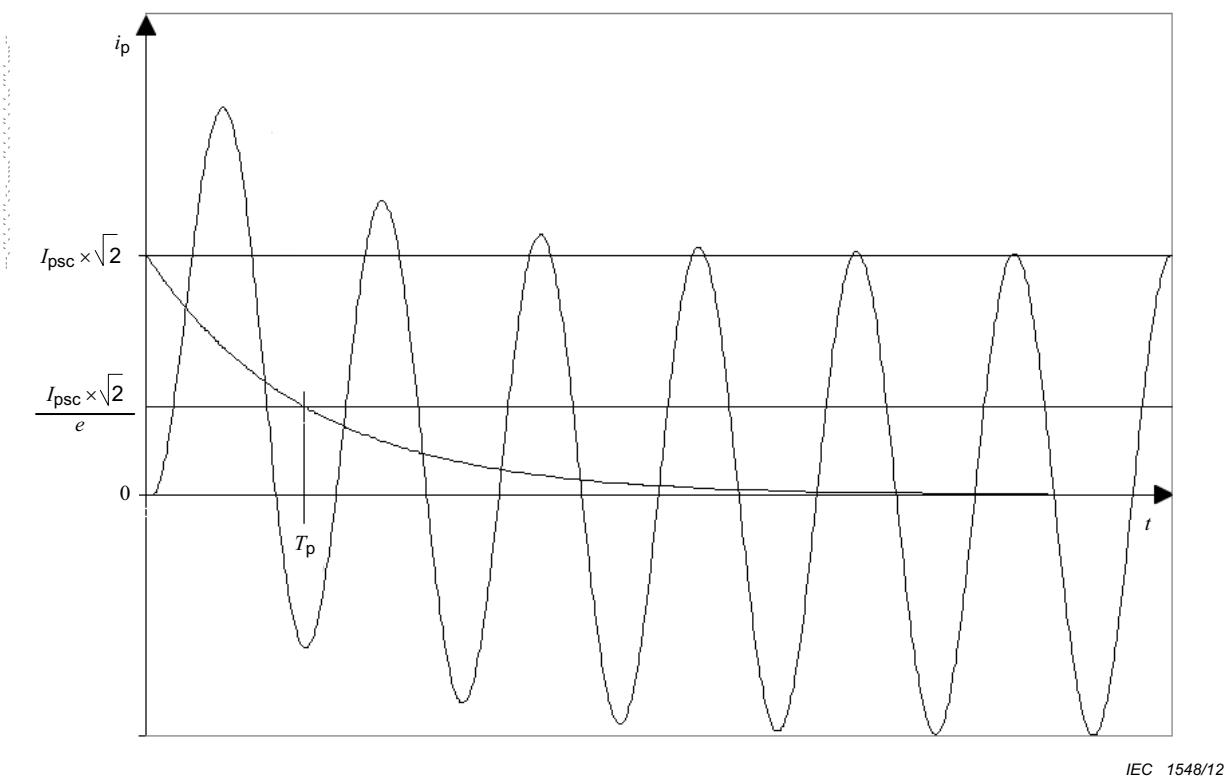


Figure 202 – Constante de temps du primaire T_p

3.4.226
durée de premier défaut
t'
durée du défaut dans un cycle de fonctionnement C-O, ou durée du premier défaut dans un cycle de fonctionnement C-O-C-O

Note 1 à l'article: Voir Figure 201.

3.4.227
durée de deuxième défaut
t''
durée du deuxième défaut dans un cycle de fonctionnement C-O-C-O

Note 1 à l'article: Voir Figure 201.

3.4.228
durée spécifiée jusqu'à la limite de précision dans le premier défaut
t'_{al}
durée d'un cycle de fonctionnement C-O, ou de la première excitation d'un cycle de fonctionnement C-O-C-O, pendant laquelle la précision spécifiée doit être maintenue

Note 1 à l'article: Voir Figure 201. Cette durée est habituellement définie par le temps critique de mesure du système de protection associé.

3.4.229
durée spécifiée jusqu'à la limite de précision dans le deuxième défaut
t''_{al}
durée de la deuxième excitation d'un cycle de fonctionnement C-O-C-O pendant laquelle la précision spécifiée doit être maintenue

Note 1 à l'article: Voir Figure 201. Cette durée est habituellement définie par le temps critique de mesure du système de protection associé.

3.4.230
temps de répétition de défaut
t_{fr}
intervalle de temps écoulé, au cours d'un cycle de réenclenchement automatique de disjoncteur, entre la coupure du courant primaire de court-circuit et sa seconde application en cas d'échec de la suppression de défaut

Note 1 à l'article: Voir Figure 201.

3.4.231
résistance de la boucle secondaire
R_s
résistance totale du circuit secondaire

$$R_s = R_b + R_{ct}$$

3.4.232
facteur de courant de court-circuit symétrique assigné
K_{ssc}
rapport entre le courant primaire de court-circuit assigné et le courant primaire assigné

$$K_{ssc} = \frac{I_{psc}}{I_{pr}}$$

3.4.233
facteur de régime transitoire
K_{tf}
rapport du flux embrassé par l'enroulement secondaire à un temps spécifié d'un cycle de fonctionnement et de la valeur de crête de sa composante alternative

Note 1 à l'article: K_{tf} est calculé analytiquement selon différentes formules en fonction de T_P, *de* T_S, du cycle de fonctionnement et de l'angle d'apparition du courant de court-circuit. Une détermination de K_{tf} est donnée à l'Annexe 2B.1

Note 2 à l'article: Figure 203 montre des évolutions possibles du flux embrassé par l'enroulement secondaire pour des différents angles d'apparition γ du courant de court-circuit.

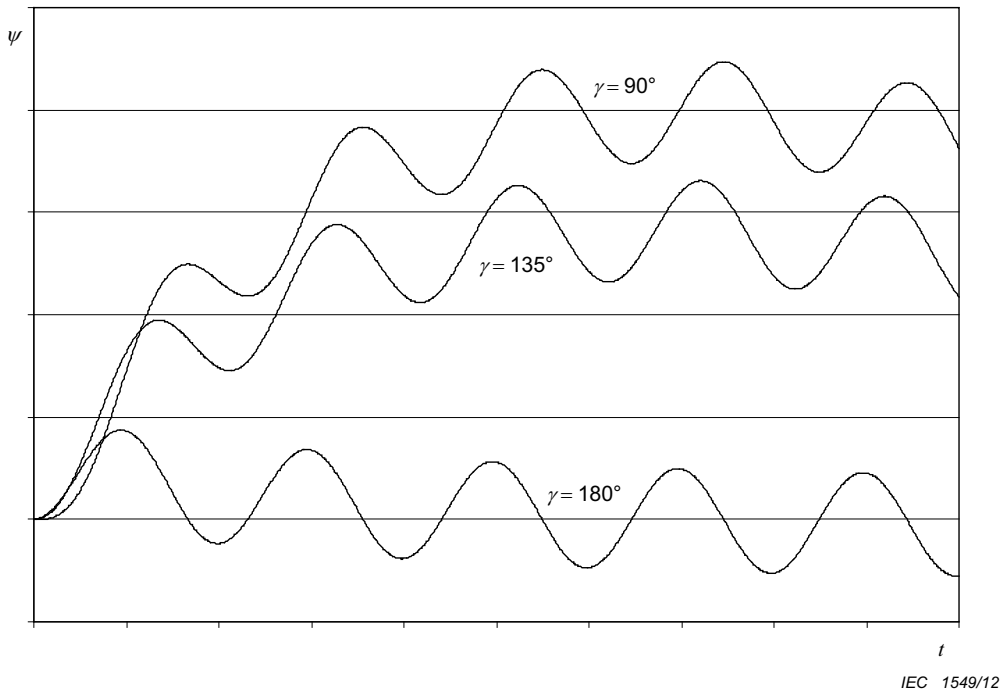


Figure 203 – Flux embrassé par l'enroulement secondaire pour des différents angles d'apparition γ du courant de court-circuit

3.4.234
facteur de dimensionnement pour le régime transitoire
K_{td}
facteur de dimensionnement permettant de prendre en compte l'augmentation du flux embrassé par l'enroulement secondaire sous l'effet d'une composante continue du courant primaire de court-circuit

Note 1 à l'article: Alors que K_{tf} est défini comme fonction du temps, K_{td} est le paramètre de dimensionnement final. K_{td} est dérivé des exigences du transformateur de courant indiquées par le constructeur du relais (et basées sur les essais de type de stabilité du relais) ou des considérations les plus pessimistes, basées sur les courbes de K_{tf} (voir Annexe 2B.1).

3.4.235
transformateur de courant à faible réactance de fuite
transformateur de courant pour lequel la mesure aux bornes secondaires (le primaire étant en circuit ouvert) suffit pour déterminer sa conformité aux limites de précision requises pour la classe protection

--`,,`,,`-`-`,,`,,`,`,,`---

3.4.236
transformateur de courant à forte réactance de fuite
transformateur de courant qui ne répond pas aux exigences du paragraphe 3.4.235 et pour lequel le constructeur prévoit une marge supplémentaire afin de tenir compte des effets d'influence qui produisent un flux de fuite supplémentaire

3.4.237
force électromotrice secondaire limite équivalente assignée
$\boldsymbol{E_{al}}$
valeur efficace de la force électromotrice équivalente du circuit secondaire à la fréquence assignée nécessaire pour satisfaire les exigences du cycle de fonctionnement spécifié:

$$E_{al} = K_{ssc} \times K_{td} \times (R_{ct} + R_b) \times I_{sr}$$

3.4.238
valeur de crête du courant secondaire d'excitation à $\boldsymbol{E_{al}}$
$\boldsymbol{\hat{I}_{al}}$
valeur de crête du courant d'excitation lorsque une tension correspondant à E_{al} est appliquée aux bornes secondaire et que l'enroulement primaire est ouvert

3.4.239
facteur de construction
$\boldsymbol{F_c}$
facteur représentant les différences de résultats de mesure entre la méthode d'essai direct et la méthode d'essai indirect, susceptibles d'apparaître dans les conditions limites

Note 1 à l'article: La procédure de mesure est donnée à l'Annexe 2B.3.3.

3.7 Index des abréviations

Le paragraphe 3.7 de la norme CEI 61869-1:2007 est remplacé par ce qui suit:

AIS	Appareillage à isolation par air
ALF	Facteur limite de précision
CT	transformateur de courant
CVT	transformateur capacitif de tension
E_{al}	force électromotrice secondaire limite équivalente assignée
E_{ALF}	force électromotrice limite secondaire pour les transformateurs de courant pour protection
E_{FS}	force électromotrice limite secondaire pour les transformateurs de courant pour mesure
E_k	force électromotrice de coude assignée
F	charge mécanique
F_c	facteur de construction
f_R	fréquence assignée
F_{rel}	taux de fuite relatif
FS	facteur de sécurité pour les appareils
GIS	appareillage à isolation gazeuse
$\hat{I}_{al}$	valeur de crête du courant secondaire d'excitation à U_{al}
I_{cth}	courant thermique permanent assigné
I_{dyn}	courant dynamique assigné
I_e	courant d'excitation

I_{PL}	courant limite assigné pour les appareils
I_{pr}	courant primaire assigné
I_{psc}	courant primaire de court-circuit assigné
I_{sr}	courant secondaire assigné
IT	transformateur de mesure
I_{th}	courant de court-circuit thermique assigné
i_{ε}	courant d'erreur instantané
k	rapport de transformation réel
k_r	rapport de transformation assigné
K_R	facteur de rémanence
K_{ssc}	facteur de courant de court-circuit symétrique assigné
K_{td}	facteur de dimensionnement pour le régime transitoire
K_{tf}	facteur transitoire
K_x	facteur de dimensionnement
L_m	inductance de magnétisation
R_b	charge résistive assignée
R_{ct}	résistance de l'enroulement secondaire
R_s	résistance de la boucle secondaire
S_r	puissance de sortie assignée
t'	durée de premier défaut
t''	durée de deuxième défaut
t'_{al}	durée spécifiée jusqu'à la limite de précision dans le premier défaut
t''_{al}	durée spécifiée jusqu'à la limite de précision dans le deuxième défaut
t_{fr}	temps de répétition de défaut
T_p	constante de temps du primaire spécifiée
T_s	constante de temps de la boucle secondaire
U_m	tension la plus élevée pour le matériel
U_{sys}	tension la plus élevée du réseau
VT	transformateur de tension
$\Delta\varphi$	déphasage
ε	erreur de rapport
ε_c	erreur composée
$\hat{\varepsilon}$	valeur de crête de l'erreur instantanée
$\hat{\varepsilon}_{ac}$	valeur de crête de la composante alternative de l'erreur
Ψ_r	flux rémanent
Ψ_{sat}	flux de saturation

5 Caractéristiques assignées

5.3 Niveaux d'isolement assignés

5.3.2 Niveau d'isolement assigné des bornes primaires

L'Article 5.3.2 de la CEI 61869-1:2007 s'applique avec le complément suivant:

Pour un transformateur de courant sans enroulement primaire et sans isolation primaire propre, la valeur U_m = 0,72 kV est considérée.

5.3.5 Exigences d'isolement pour les bornes secondaires

L'Article 5.3.5 de la CEI 61869-1:2007 s'applique avec le complément suivant:

L'isolation de l'enroulement secondaire de transformateurs de courant de classe PX ou PXR ayant une force électromotrice de coude assignée $E_k \geq 2$ kV doit être capable de supporter une tension de tenue assignée à fréquence industrielle de 5 kV (valeur efficace) pendant 60 s.

5.3.201 Exigences d'isolement entre spires

La tension de tenue assignée de l'isolation entre spires doit être de 4,5 kV en valeur de crête.

Pour les transformateurs de classe PX ou PXR présentant une force électromotrice de coude assignée supérieure à 450 V, la tension de tenue assignée de l'isolation entre spires doit être une tension de crête égale à 10 fois la valeur efficace de la force électromotrice de coude spécifiée limitée à 10 kV (valeur crête).

NOTE 1 Il est possible que la forme d'onde soit fortement déformée par suite de la procédure d'essai.

NOTE 2 En accord avec la méthode d'essai 7.3.204, des valeurs de tension plus faibles peuvent apparaître.

5.5 Puissance de sortie assignée

5.5.201 Valeurs de la puissance de sortie assignée

Les valeurs normales de la puissance de sortie assignée pour les classes de mesure (P et PR) sont les suivantes:

2,5 – 5,0 – 10 – 15 et 30 VA

Des valeurs supérieures à 30 VA peuvent être choisies afin de répondre aux besoins.

NOTE Pour un transformateur donné, pourvu qu'une des valeurs de puissance de sortie assignée soit normale et associée à une classe de précision normale, l'indication d'autres valeurs de puissance de sortie assignée qui peuvent ne pas être normales, mais associées à d'autres classes de précision normales, n'est pas exclue.

5.5.202 Valeurs de charge résistive assignée

Les valeurs normales de la charge résistive assignée, exprimée en ohms, des transformateurs de courant des classes TPX, TPY et TPZ, sont les suivantes:

0,5 – 1 – 2 – 5 Ohm

Les valeurs préférentielles sont soulignées. Les valeurs sont basées sur un courant secondaire assigné de 1 A. Pour les transformateurs de courant ayant un courant secondaire assigné différent de 1 A, les valeurs indiquées ci-dessus doivent être adaptées en raison inverse du carré du courant.

NOTE Pour un transformateur donné, pourvu qu'une des valeurs de charge résistive assignée soit normalisée et associée à une classe de précision normale, l'indication d'autres valeurs de charge résistive assignée qui peuvent ne pas être normales, mais associées à d'autres classes de précision normales, n'est pas exclue.

5.6 Classe de précision assignée

5.6.201 Transformateurs de courant pour mesure

5.6.201.1 Désignation de la classe de précision d'un transformateur de courant pour mesure

La classe de précision des transformateurs de courant pour mesure est désignée par le plus haut pourcentage admissible d'erreur de rapport (ε) au courant primaire assigné et à la puissance de sortie assignée.

5.6.201.2 Classes de précision normales

Les classes de précision normales des transformateurs de courant pour mesure sont les suivantes:

0,1 – 0,2 – 0,2S – 0,5 – 0,5S – 1 – 3 – 5

5.6.201.3 Limites de l'erreur de rapport (ε) et du déphasage pour les transformateurs de courant pour mesure

Pour les classes 0,1 – 0,2 – 0,5 et 1, l'erreur de rapport et le déphasage, à la fréquence assignée, ne doivent pas dépasser les valeurs données dans le Tableau 201, pour toute valeur de charge comprise entre 25 % et 100 % de la puissance de sortie assignée.

Pour les classes 0,2S et 0,5S, l'erreur de rapport et le déphasage, à la fréquence assignée, ne doivent pas dépasser les valeurs données dans le Tableau 202, pour toute valeur de charge comprise entre 25 % et 100 % de la puissance de sortie assignée.

Pour les classes 3 et 5, l'erreur de rapport, à la fréquence assignée, ne doit pas dépasser les valeurs données dans le Tableau 203, pour toute valeur de charge comprise entre 50 % et 100 % de la puissance de sortie assignée. Il n'est spécifié aucune limite de déphasage pour les classes 3 et 5.

Pour toutes les classes, la charge doit être inductive avec un facteur de puissance de 0,8 sauf si elle absorbe une puissance inférieure à 5 VA; dans ce cas, son facteur de puissance sera 1,0.

NOTE En général, les limites prescrites de l'erreur de rapport et du déphasage sont valables pour toute position donnée d'un conducteur externe placé à une distance dans l'air non inférieure à la distance requise pour l'isolement dans l'air à la tension la plus élevée pour le matériel (U_m).

Tableau 201 – Limites de l'erreur de rapport et du déphasage des transformateurs de courant pour mesure (classes de 0,1 à 1)

Classe de précision	Erreur de rapport				Déphasage							
	± %				Minutes (±)				Centiradians (±)			
	au courant (% de la valeur assignée)				au courant (% de la valeur assignée)				au courant (% de la valeur assignée)			
	5	20	100	120	5	20	100	120	5	20	100	120
0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	15	8	5	5	0,45	0,24	0,15	0,15
0,2	0,75	0,35	0,2	0,2	30	15	10	10	0,9	0,45	0,3	0,3
0,5	1,5	0,75	0,5	0,5	90	45	30	30	2,7	1,35	0,9	0,9
1	3,0	1,5	1,0	1,0	180	90	60	60	5,4	2,7	1,8	1,8

Tableau 202 – Limites de l'erreur de rapport (ε) et du déphasage des transformateurs de courant pour mesure pour applications particulières

Classe de précision	Erreur de rapport ± %					Déphasage									
						Minutes (±)					Centiradians (±)				
	au courant (% de la valeur assignée)					au courant (% de la valeur assignée)					au courant (% de la valeur assignée)				
	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120
0,2S	0,75	0,35	0,2	0,2	0,2	30	15	10	10	10	0,9	0,45	0,3	0,3	0,3
0,5S	1,5	0,75	0,5	0,5	0,5	90	45	30	30	30	2,7	1,35	0,9	0,9	0,9

Tableau 203 – Limites de l'erreur de rapport des transformateurs de courant pour mesure (classes 3 et 5)

Classe	Erreur de rapport ± %	
	au courant (% de la valeur assignée)	
	50	120
3	3	3
5	5	5

5.6.201.4 Gamme de charge étendue

Pour toutes les classes de mesure, il est possible de spécifier une gamme de charge étendue. L'erreur de rapport et le déphasage ne doivent pas dépasser les limites de la classe correspondante, définies dans le Tableau 201, le Tableau 202 et le Tableau 203 pour la gamme de charge secondaire comprise entre 1 VA et la charge assignée. Le facteur de puissance doit être de 1,0 dans toute la gamme de charge. La charge assignée maximale est limitée à 15 VA.

5.6.201.5 Transformateurs à gamme étendue

Des transformateurs de courant de classes de précision 0,1 à 1 seront considérés comme possédant une gamme étendue en courant, s'ils satisfont aux deux conditions suivantes:

a) le courant thermique permanent assigné doit être égal au courant primaire étendu assigné;

b) les limites d'erreur de rapport et de déphasage prescrites pour 120 % du courant primaire assigné dans le Tableau 201 doivent être conservées jusqu'au courant primaire étendu assigné.

Le courant primaire étendu assigné doit être exprimé en pourcentage du courant primaire assigné.

5.6.201.6 Facteur de sécurité

Un facteur de sécurité peut être spécifié pour les appareils.

Les valeurs normales sont: FS 5 et FS 10

5.6.202 Transformateurs de courant pour protection

5.6.202.1 Généralités

Trois méthodes différentes sont prévues pour définir les transformateurs de courant pour protection (voir Tableau 204). Chacune des trois définitions peut conduire en pratique à la même réalisation physique.

Tableau 204 – Caractéristiques des classes de protection

Désignation	Limite de flux rémanent	Explication
P PR	non[a] oui	Définition d'un transformateur de courant satisfaisant aux exigences d'erreur composée dans des conditions de courant de court-circuit symétrique en régime établi
PX PXR	non[a,b] oui[b]	Définition d'un transformateur de courant par spécification de ses caractéristiques de magnétisation
TPX TPY TPZ	non[a] oui oui	Définition d'un transformateur de courant satisfaisant aux exigences d'erreur en régime transitoire dans des conditions de courant de court-circuit asymétrique

[a] Bien qu'il n'existe aucune limite de flux rémanent, des entrefers sont autorisés, par exemple dans les transformateurs de courant à circuit magnétique ouvrant.

[b] Pour distinguer les classes PX et PXR, le critère de flux de rémanence doit être utilisé.

5.6.202.2 Transformateur de courant pour protection de classe P

5.6.202.2.1 Valeurs normales des facteurs limites de précision (ALF)

Les valeurs normales des facteurs limites ALF sont les suivantes:

5 – 10 – 15 – 20 – 30

5.6.202.2.2 Désignation de la classe de précision

La classe de précision est désignée par la limite supérieure de l'erreur composée, exprimée en pourcentage, suivie de la lettre «P» (pour «protection») et de la valeur ALF.

5.6.202.2.3 Classes de précision normales

Les classes de précision normales des transformateurs de courant pour protection sont les suivantes:

5P et 10P

5.6.202.2.4 Limites d'erreur des transformateurs de courant pour protection de classe P

A la fréquence assignée et la charge assignée étant connectée, l'erreur de rapport, le déphasage et l'erreur composée ne doivent pas dépasser les limites données dans le Tableau 205.

La charge assignée doit avoir un facteur de puissance de 0,8 (circuit inductif) sauf si la charge assignée absorbe une puissance inférieure à 5 VA; dans ce cas, on doit utiliser un facteur de puissance de 1,0.

Tableau 205 – Limites d'erreur des transformateurs de courant pour protection des classes P et PR

Classe de précision	Erreur de rapport au courant primaire assigné	Déphasage au courant primaire assigné		Erreur composée au courant limite de précision assigné
	± %	Minutes (±)	Centiradians (±)	%
5P et 5PR	1	60	1,8	5
10P et 10PR	3	–	–	10

5.6.202.3 Transformateurs de courant pour protection de classe PR

5.6.202.3.1 Valeurs normales des facteurs limites de précision

Les valeurs normales des facteurs limites ALF sont les suivantes:

5 – 10 – 15 – 20 – 30

5.6.202.3.2 Désignation de la classe de précision

La classe de précision est désignée par la limite supérieure de l'erreur composée, exprimée en pourcentage, suivie des lettres "PR" (pour protection et faible rémanence) et de la valeur ALF.

5.6.202.3.3 Classes de précision normales

Les classes de précision normales des transformateurs de courant de classe PR sont les suivantes:

5PR et 10PR

5.6.202.3.4 Limites d'erreur des transformateurs de courant pour protection de classe PR

A la fréquence assignée et la charge assignée étant connectée, l'erreur de rapport, le déphasage et l'erreur composée ne doivent pas dépasser les limites données dans le Tableau 205.

La charge assignée doit avoir un facteur de puissance de 0,8 (circuit inductif) sauf si la charge assignée absorbe une puissance inférieure à 5 VA; dans ce cas, on doit utiliser un facteur de puissance de 1,0.

5.6.202.3.5 Facteur de rémanence (K_R)

Le facteur de rémanence (K_R) ne doit pas être supérieur à 10 %.

NOTE L'insertion d'un ou de plusieurs entrefers dans le circuit magnétique constitue une méthode de limitation du facteur de rémanence.

5.6.202.3.6 Constante de temps de la boucle secondaire (T_s)

Il est permis de spécifier la constante de temps de la boucle secondaire.

5.6.202.3.7 Résistance de l'enroulement secondaire (R_{ct})

Il est permis de spécifier la limite supérieure de résistance de l'enroulement secondaire.

5.6.202.4 Transformateurs de courant pour protection des classes PX et PXR

Les caractéristiques des transformateurs de courant des classes PX et PXR doivent être spécifiées dans les termes suivants:

– courant primaire assigné (I_{pr});
– courant secondaire assigné (I_{sr});
– rapport des nombres de spires assigné;
– force électromotrice de coude assignée (E_k);
– limite supérieure du courant d'excitation (I_e) à la force électromotrice de coude assignée et/ou à un pourcentage donné de celle-ci;
– limite supérieure de la résistance de l'enroulement secondaire (R_{ct}).

Au lieu de donner explicitement la force électromotrice de coude assignée, E_k peut être calculé comme suit:

$$E_k = K_x \times \left(R_{ct} + R_b\right) \times I_{sr}$$

Dans ce cas, la charge résistive assignée (R_b) et le facteur de dimensionnement (K_x) doivent être spécifiés, et la choix de la valeur R_{ct} est laissée au constructeur.

Pour la classe PX, l'erreur sur le rapport des nombres de spires ne doit pas dépasser la limite de ±0,25 %.

Pour la classe PXR, l'erreur sur le rapport des nombres de spires ne doit pas dépasser la limite de ±1 %.

Pour la classe PXR, le facteur de rémanence ne doit pas être supérieur à 10 %.

NOTE 201 Pour garantir un facteur de rémanence <= 10 %, les transformateurs de courant de classe PXR peuvent comporter des entrefers.

NOTE 202 Pour les circuits magnétiques de grande dimension et à faible ampère-tour de classe PXR, il peut être difficile de satisfaire à l'exigence du facteur de rémanence. Dans de tels cas, un facteur de rémanence supérieur à 10 % peut être accepté.

5.6.202.5 Transformateurs de courant pour protection en régime transitoire

5.6.202.5.1 Limites d'erreur pour les transformateurs de courant de classes TPX, TPY et TPZ

La charge résistive assignée étant connectée au transformateur de courant et à la fréquence assignée, l'erreur de rapport et le déphasage ne doivent pas dépasser les limites données dans le Tableau 206.

Lorsque le cycle de fonctionnement spécifié (ou un cycle de fonctionnement qui correspond au facteur de dimensionnement pour le régime transitoire K_{td}) est appliqué au transformateur de courant branché sur la charge résistive assignée, les erreurs transitoires $\hat{\varepsilon}$ (pour classes TPX et TPY) ou $\hat{\varepsilon}_{ac}$ (pour classe TPZ) ne doivent pas dépasser les limites données dans le Tableau 206.

Toutes les limites d'erreur sont données pour une température de l'enroulement secondaire de 75°C.

Tableau 206 – Limites d'erreur pour les transformateurs de courant de classes TPX, TPY et TPZ

Classe	Au courant primaire assigné			Limite d'erreur transitoire sous la condition du cycle de fonctionnement spécifié
	Erreur de rapport	Déphasage[a]		
	± %	Minutes	Centiradians	
TPX	0,5	±30	±0,9	$\hat{\varepsilon}$ =10 %
TPY	1,0	±60	±1,8	$\hat{\varepsilon}$ =10 %[b]
TPZ	1,0	180±18	5,3±0,6	$\hat{\varepsilon}_{ac}$ =10 %

NOTE 1 Dans certains cas, la valeur absolue du déphasage peut présenter moins d'importance que le fait de minimiser son écart-type dans une série de fabrication donnée

NOTE 2 Pour les circuits magnétiques de classe TPY, il est possible d'employer la formule suivante à la condition que la valeur correspondante de E_{al} ne dépasse pas la zone linéaire de la courbe de magnétisation:

$$\hat{\varepsilon} = \frac{K_{td}}{2\pi f_R \times T_s} \times 100\,\%$$

5.6.202.5.2 Limites du facteur de rémanence (K_R)

TPX: aucune limite

TPY: $K_R \leq 10\,\%$

TPZ: $K_R \leq 10\,\%$

NOTE Pour la classe TPZ, un facteur de rémanence << 10 %, est donné par la construction. Par conséquent, le flux rémanent peut être négligé.

5.6.202.5.3 Méthodes de spécification

Les deux méthodes de spécification sont illustrées dans le Tableau 207.

Dans certains cas, le choix d'un cycle de fonctionnement spécifique ne peut pas décrire toutes les exigences de protection. En conséquence, la spécification alternative donne la possibilité de spécifier des «exigences globales» qui couvrent les exigences de différents cycles de fonctionnement. Les deux méthodes de spécifications ne doivent pas être combinées, sinon le transformateur de courant pourrait être indéterminé.

Tableau 207 – Méthodes de spécification des transformateurs de courant de classes TPX, TPY et TPZ

Spécification normale	Spécification alternative
Désignation de la classe du transformateur de courant (TPX, TPY ou TPZ)	Désignation de la classe du transformateur de courant (TPX, TPY ou TPZ)
Facteur de courant de court-circuit symétrique assigné K_{ssc}	Facteur de courant de court-circuit symétrique assigné K_{ssc}
Cycle de fonctionnement, défini par pour le cycle C-O: t'_{al} pour le cycle C-O-C-O: t'_{al}, t', t_{fr}, t''_{al}	Facteur de dimensionnement pour le régime transitoire assigné K_{td} Constante de temps assignée de la boucle secondaire T_S (pour circuits magnétiques TPY uniquement)
Constante de temps du primaire assignée T_p	
Charge résistive assignée R_b	Charge résistive assignée R_b

NOTE 1 Pour les transformateurs de courant avec prises au secondaire, les exigences de précision données peuvent être satisfaites pour un rapport seulement.

NOTE 2 Pour les transformateurs de courant avec couplage primaire, les exigences de précision peuvent être satisfaites pour plusieurs rapports. Dans ce cas, il convient de prêter attention au facteur de construction F_c, qui peut être influencé par la configuration des conducteurs primaires.

NOTE 3 Si la spécification alternative est utilisée, K_{td} est normalement donné par le fournisseur du dispositif de protection. Dans ce cas, T_S doit aussi être spécifiée, car c'est le seul paramètre du transformateur de courant qui est utilisé pour le calcul de K_{td}.

5.6.203 Spécification de classe pour les transformateurs de courant à rapports de transformation sélectionnables

5.6.203.1 Performance de précision pour transformateurs de courant avec couplage primaire

Pour toutes les classes de précision, la performance de précision doit être respectée pour tous les couplages spécifiés.

5.6.203.2 Performance de précision pour transformateurs de courant avec prises au secondaire

Pour toutes les classes de précision, la performance de précision doit être respectée au rapport le plus élevé, sauf indication contraire.

Lorsque l'acheteur en fait la demande, le constructeur doit donner des informations sur la performance de précision aux rapports inférieurs.

5.201 Valeurs normales du courant primaire assigné

Les valeurs normales du courant primaire assigné sont les suivantes:

--`,,`,,-`-`,,`,,`,`,,`---

10 – 12,5 – 15 – 20 – 25 – 30 – 40 – 50 – 60 – 75 A

et leurs multiples ou sous-multiples décimaux.

Les valeurs préférentielles sont soulignées.

5.202 Valeurs normales du courant secondaire assigné

Les valeurs normales du courant secondaire assigné sont de 1 A et 5 A.

Pour les transformateurs de courant pour protection pour réponse en régime transitoire, la valeur normale du courant secondaire assigné est de 1 A.

5.203 Valeurs normales du courant thermique permanent assigné

La valeur normale du courant thermique permanent assigné est le courant primaire assigné.

Lorsqu'un courant thermique permanent assigné supérieur au courant primaire assigné est spécifié, les valeurs préférentielles sont de 120 %, 150 % et 200 % du courant primaire assigné.

5.204 Courants de court-circuit assignés

5.204.1 Courant de court-circuit thermique assigné (I_{th})

Un courant de court-circuit thermique assigné (I_{th}) doit être assigné au transformateur (voir 3.3.203).

La valeur normale de la durée du courant de court-circuit thermique assigné est de 1 s.

5.204.2 Courant dynamique assigné (I_{dyn})

La valeur normale du courant dynamique assigné (I_{dyn}) est de 2,5 fois le courant de court-circuit thermique assigné (I_{th}).

6 Conception et construction

6.4 Exigences relatives à l'échauffement des parties et des composants

6.4.1 Généralités

Le présent article de la CEI 61869-1:2007 s'applique avec le complément suivant:

L'échauffement d'un transformateur de courant parcouru par un courant primaire égal au courant thermique permanent assigné, avec une charge de facteur de puissance unité correspondant à la puissance de sortie assignée, ne doit pas dépasser la valeur appropriée, donnée dans le Tableau 5 de la CEI 61869-1:2007. Ces valeurs sont basées sur les conditions de service de l'Article 4.

6.13 Marquage

6.13.201 Marquage des bornes

6.13.201.1 Règles générales

Le marquage des bornes doit identifier:

a) les enroulements primaires et secondaires;

b) les sections de chaque enroulement, lorsqu'il est divisé en sections;

c) les polarités relatives des enroulements et des sections d'enroulements;

d) les prises intermédiaires, le cas échéant.

6.13.201.2 Mode de marquage

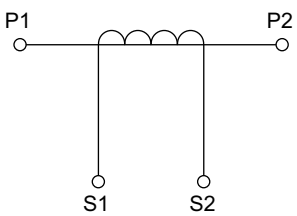
Le marquage doit être constitué de lettres suivies ou précédées si nécessaire de chiffres. Les lettres doivent être en majuscules d'imprimerie.

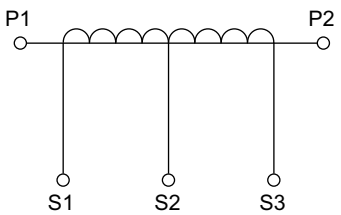
6.13.201.3 Marquage à employer

Le marquage des bornes d'un transformateur de courant doit être tel qu'indiqué dans le Tableau 208:

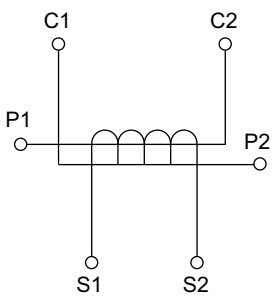
Tableau 208 – Marquage des bornes

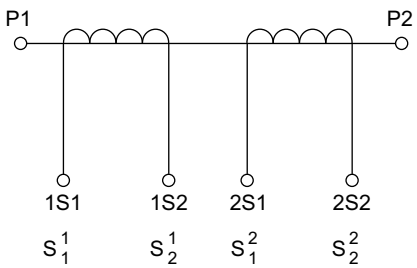
<table>
<tr>
<td>Bornes primaires

Bornes secondaires</td>
<td> 

Transformateur simple rapport</td>
<td> 

Transformateur à prise intermédiaire sur l'enroulement secondaire</td>
</tr>
<tr>
<td>Bornes primaires

Bornes secondaires</td>
<td> 

Transformateur à enroulement primaire à 2 sections, pour couplage en série ou parallèle</td>
<td> 

Transformateurs à 2 enroulements secondaires; chacun ayant son circuit magnétique propre (deux variantes pour le marquage des bornes secondaires)</td>
</tr>
</table>

6.13.201.4 Indication des polarités relatives

Les bornes marquées P1, S1 et C1 doivent avoir, à tout instant, la même polarité.

6.13.202 Marquage des plaques signalétiques

6.13.202.1 Généralités

En plus des marquages définis dans l'Article 6.13 de la CEI 61869-1:2007, tous les transformateurs de courant doivent porter le marquage de plaques signalétiques général défini dans le présent article. Le marquage relatif aux classes de précisions particulières est donné dans les Paragraphes 6.13.202.2 à 6.13.202.6.

a) Le courant primaire et secondaire assignés (par exemple: 100/1 A);

b) le courant de court-circuit thermique assigné (I_{th}), (par exemple: Ith = 40 kA);

c) le courant dynamique assigné (I_{dyn}), s'il diffère de 2,5 x I_{th} (par exemple: Idyn = 85 kA);

d) pour les transformateurs à deux enroulements secondaires ou plus, l'utilisation de chacun de ces enroulements et des bornes correspondantes;

e) le courant thermique permanent assigné, s'il diffère du courant primaire assigné.

EXEMPLE 1
Pour un transformateur de courant à circuit magnétique unique avec prises au secondaire: I_{cth} = 150 %
(signifie 150 % du courant primaire assigné pour chaque prise)

EXEMPLE 2
Pour un transformateur de courant comportant plusieurs circuits
magnétiques de rapports différents (par exemple, 300/5 A et 4000/1 A): Icth = 450 A
(signifie 450 A comme courant thermique permanent maximal pour tous les circuits magnétiques du transformateur de courant)

EXEMPLE 3
Pour un transformateur de courant avec couplage primaire (4x300/1 A): Icth = 4x450 A
(signifie courant thermique permanent de 450, 900 ou 1 800 A, en fonction de la couplage primaire)

Un transformateur de courant satisfaisant à plusieurs combinaisons de charges et de classes de précision peut être marqué suivant chacune d'elles.

EXEMPLE 4 5 VA cl. 0,5; 10 VA cl. 5P20

EXEMPLE 5 15 VA cl. 1; 7 VA cl. 0,5

EXEMPLE 6 5 VA cl.1 & 5P20

6.13.202.2 Marquage spécifique de la plaque signalétique d'un transformateur de courant pour mesure

La classe de précision et le facteur de sécurité (le cas échéant) doivent être mentionnés après l'indication de la puissance de sortie assignée correspondante.

EXEMPLE 1 15 VA cl. 0,5

EXEMPLE 2 15 VA cl. 0,5 FS 10

Pour les transformateurs de courant à gamme étendue (voir 5.6.201.5), cette indication doit figurer immédiatement après la classe de précision.

EXEMPLE 3 15 VA cl. 0,5 ext.150 % FS 10

Pour les transformateurs de courant à gamme de charge étendue (voir 5.6.201.4), cette indication doit figurer immédiatement avant l'indication de la classe.

EXEMPLE 4 1-10 VA classe 0,2 (gamme de charge de 1 à 10 VA de la classe 0,2)

NOTE La plaque signalétique peut contenir des indications concernant diverses combinaisons de rapport de transformation, de puissance de sortie et de classe de précision auxquelles le transformateur peut satisfaire pour le même rapport de transformation. Dans ce cas, des valeurs de puissance de sortie non normales peuvent être utilisées.

EXEMPLE 5 VA classe 1; 7 VA classe 0,5

6.13.202.3 Marquage spécifique de la plaque signalétique d'un transformateur de courant pour protection de classe P

Le facteur limite de précision assigné doit être indiqué après la puissance de sortie assignée et la classe de précision correspondantes.

EXEMPLE 30 VA classe 5P10

6.13.202.4 Marquage spécifique de la plaque signalétique des transformateurs de courant pour protection de classe PR

Le facteur limite de précision assigné doit être indiqué après la puissance de sortie assignée et la classe de précision correspondantes.

EXEMPLE 1 10 VA classe 5PR10

Si spécifiés, les valeurs suivantes doivent être indiquées:

– la constante de temps de la boucle secondaire (T_s);
– la limite supérieure de la résistance de l'enroulement secondaire (R_{ct}).

EXEMPLE 2 10 VA classe 5PR10, Ts = 200 ms, Rct <= 2,4 Ω

6.13.202.5 Marquage spécifique de la plaque signalétique des transformateurs de courant pour protection de classes PX et PXR

Les exigences de classe peuvent être indiquées comme suit:

– le rapport des nombres de spires assigné;
– la force électromotrice de coude assignée (E_k);
– la limite supérieure du courant d'excitation (I_e) à la force électromotrice de coude assignée et/ou au pourcentage donné de celle-ci;
– la limite supérieure de la résistance de l'enroulement secondaire (R_{ct}).

EXEMPLE 1 classe PX, Ek = 200 V, Ie <= 0,2A, Rct <= 2,0 Ω

Si spécifiés, les paramètres suivants doivent également être indiqués:

– le facteur de dimensionnement (K_x);
– la charge résistive assignée (R_b).

EXEMPLE 2 Ek = 200 V, Ie <= 0,2 A, Rct <= 2,0 Ω, Kx = 40, Rb = 3,0 Ω

6.13.202.6 Marquage spécifique de la plaque signalétique des transformateurs de courant pour protection en régime transitoire

Le marquage de la classe est constitué des deux éléments suivants:

a) La partie définition (obligatoire)

contient les informations essentielles nécessaires pour déterminer si le transformateur de courant satisfait aux exigences données (constituées du cycle de fonctionnement et de T_p).

EXEMPLE 1 Application avec K_{ssc}= 20 et K_{td} = 12,5:

Rb = 5Ω, classe TPX 20x12,5, Rct <= 2,8Ω

Rb = 5Ω, classe TPY 20x12,5, Rct <= 2,8Ω, Ts = 900 ms

Rb = 5Ω, classe TPZ 20x12,5, Rct <= 2,8Ω

NOTE Pour R_{ct}, la valeur maximale du lot de fabrication peut être indiquée.

b) Partie complémentaire (obligatoire seulement si un cycle de fonctionnement est spécifié par l'acheteur): La partie complémentaire représente un des nombreux cycles de fonctionnement possibles, conduisant à la même valeur de K_{td} spécifié dans l'article a).

EXEMPLE 2

Cycle 100 ms, Tp = 100 ms signifie t'_{al} =100 ms, T_p =100 ms

Cycle (40-100)-300-40 ms, Tp = 100 ms signifie t'_{al}=40 ms, t'=100 ms, t_{fr}=300 ms, t''_{al}=40 ms, T_p=100 ms

Cycle (100-100)-300-40 ms, Tp = 75 ms signifie t' = t'_{al}=100 ms, t_{fr}=300 ms, t''_{al}=40 ms, T_p= 75 ms

7 Essais

7.1 Généralités

7.1.2 Liste des essais

Le Tableau 10 de CEI 61869-1:2007 est remplacé par le nouveau Tableau 10.

Tableau 10 – Liste des essais

Essais	Paragraphe
Essais de type	**7.2**
Essai d'échauffement	7.2.2
Essai de tenue à la tension de choc sur les bornes primaires	7.2.3
Essai sous pluie pour les transformateurs de type extérieur	7.2.4
Essais de compatibilité électromagnétique	7.2.5
Essais concernant la précision	7.2.6
Vérification du degré de protection fourni par les enveloppes	7.2.7
Essai d'étanchéité de l'enveloppe à température ambiante	7.2.8
Essai de pression sur l'enveloppe	7.2.9
Essais de tenue aux courants de courte durée	7.2.201
Essais individuels de série	**7.3**
Essais de tenue à la tension à fréquence industrielle sur les bornes primaires	7.3.1
Mesure des décharges partielles	7.3.2
Essais de tenue à la tension à fréquence industrielle entre les sections	7.3.3
Essais de tenue à la tension à fréquence industrielle sur les bornes secondaires	7.3.4
Essais concernant la précision	7.3.5
Vérification des marquages	7.3.6
Essai d'étanchéité de l'enveloppe à température ambiante	7.3.7
Essai de pression sur l'enveloppe	7.3.8
Détermination de la résistance de l'enroulement secondaire	7.3.201
Détermination de la constante de temps de la boucle secondaire	7.3.202
Essai pour la force électromotrice de coude assignée et courant d'excitation à E_k	7.3.203
Essai de surtension entre spires	7.3.204
Essais spéciaux	**7.4**
Essai de tenue à la tension de choc coupée sur les bornes primaires	7.4.1
Essai de chocs coupés multiples sur les bornes primaires	7.4.2
Mesure de la capacité et du facteur de dissipation diélectrique	7.4.3
Essai de surtension transmise	7.4.4
Essais mécaniques	7.4.5
Essai de défaut d'arc interne	7.4.6
Essai d'étanchéité de l'enveloppe à basse et haute température	7.4.7
Essai de point de rosée du gaz	7.4.8
Essai de corrosion	7.4.9
Essai relatif au danger d'incendie	7.4.10
Essais sur prélèvements	**7.5**
Détermination du facteur de rémanence	7.5
Détermination du facteur de sécurité (FS) pour les appareils des transformateurs de courant pour mesure	7.5.2

Le Tableau 11 de la CEI 61869-1:2007 s'applique, en y ajoutant la note suivante:

Pour les transformateurs de courant GIS, les essais de précision peuvent être réalisés sans isolant gazeux.

7.2 Essais de type

7.2.2 Essai d'échauffement

Le paragraphe 7.2.2 de la CEI 61869-1:2007 s'applique avec les compléments suivants:

7.2.2.201 Montage d'essai

Le transformateur de courant doit être monté d'une manière représentative du montage en service et les enroulements secondaires doivent être raccordés à des charges selon 6.4.1. Toutefois, puisque la position du transformateur de courant dans chaque poste peut être différente, le choix de l'agencement du montage d'essai est laissé à l'appréciation du constructeur.

Pour les transformateurs de courant destinés à des postes triphasés sous enveloppe métallique à isolation gazeuse, les trois phases doivent être soumises à l'essai en même temps.

7.2.2.202 Mesure de la température ambiante

Les capteurs destinés à mesurer la température ambiante doivent être répartis autour du transformateur de courant, à une distance appropriée eu égard aux caractéristiques assignées du transformateur et environ à mi-hauteur de ce dernier. Ils doivent être protégés du rayonnement thermique direct.

Pour minimiser les effets de la variation de la température de l'air de refroidissement, en particulier pendant la dernière période d'essai, il convient d'utiliser des moyens appropriés pour les capteurs de température, tels que des dissipateurs de chaleur ayant une constante de temps approximativement égale à celle du transformateur.

La moyenne des relevés des deux capteurs doivent être utilisés pour l'essai.

7.2.2.203 Durée de l'essai

Il est possible de mettre fin à l'essai lorsque les deux conditions suivantes sont satisfaites:

– la durée de l'essai est au moins égale à trois fois la constante de temps thermique du transformateur de courant;
– la variation d'échauffement des enroulements (et de l'huile en tête des transformateurs immergés dans l'huile) ne doit pas dépasser 1 K par heure, pendant trois relevés d'échauffement consécutifs.

Le constructeur doit estimer la constante de temps thermique par l'une des méthodes suivantes:

– avant l'essai, en se basant sur les résultats d'essais précédents, réalisés sur un dispositif similaire. La constante de temps thermique doit être confirmés pendant l'essai d'échauffement;
– pendant l'essai, d'après la ou les courbes d'échauffement ou la ou les courbes de diminution de température enregistrées au cours de l'essai et calculées selon l'Annexe 2D;
– pendant l'essai, en tant que point d'intersection entre la tangente à la courbe d'échauffement partant de 0 et l'échauffement maximal estimé;
– pendant l'essai, à 63 % de l'échauffement maximal estimé.

7.2.2.204 Températures et échauffements

L'objectif de l'essai est de déterminer l'échauffement moyen des enroulements et, pour les transformateurs immergés dans l'huile, l'échauffement de l'huile en tête, en régime établi,

lorsque les pertes résultant des conditions de service spécifiées sont générées dans le transformateur de courant.

La température moyenne des enroulements doit être déterminée si possible par la méthode de variation de résistance; pour les enroulements de très faible résistance, il est toutefois permis d'utiliser un thermomètre, un thermocouple ou d'autres capteurs de température.

Des thermomètres ou thermocouples doivent mesurer l'échauffement des parties autres que les enroulements. La température de l'huile en tête doit être mesurée au moyen de capteurs placés sur le haut de la tête métallique, qui est en contact direct avec l'huile.

L'échauffement doit être déterminé en tant que différence par rapport à la température ambiante, mesurée comme indiqué au paragraphe 7.2.2.202.

7.2.2.205 Modalités d'essai pour les transformateurs de courant avec U_m < 550 kV

L'essai doit être effectué en appliquant à l'enroulement primaire le courant thermique permanent assigné.

NOTE Sous réserve d'accord entre le constructeur et l'acheteur, le courant d'essai peut également être appliqué en alimentant un ou plusieurs enroulements secondaires, si les tensions aux bornes secondaires des noyaux alimentés sont aussi grandes que les tensions apparaissant lorsqu'ils sont branchés sur la charge assignée, l'enroulement primaire étant mis en court-circuit et le ou les enroulements secondaires non alimentés étant connectés à leurs charges assignées.

7.2.2.206 Modalités d'essai pour les transformateurs de courant immergés dans l'huile avec $U_m \geq 550$ kV

L'essai doit être effectué en appliquant simultanément au transformateur de courant:

- le courant thermique permanent assigné à l'enroulement primaire;

  Le courant d'essai peut également être appliqué par excitation de un ou plusieurs enroulements secondaires si les tensions aux bornes secondaires des noyaux alimentés sont aussi grandes que les tensions apparaissant lorsqu'ils sont branchés sur la charge assignée, l'enroulement primaire étant mis en court-circuit et le ou les enroulements secondaires non alimentés étant connectés à leurs charges assignées.
- la tension la plus élevée du matériel divisée par $\sqrt{3}$ entre l'enroulement primaire et la terre. Une borne de chaque enroulement secondaire doit être connectée à la terre.

7.2.3 Essai de tenue à la tension de choc sur les bornes primaires

7.2.3.1 Généralités

Le paragraphe 7.2.3.1 de la CEI 61869-1:2007 s'applique avec les compléments suivants:

La tension d'essai doit être appliquée entre les bornes de l'enroulement primaire, mises en court-circuit, et la terre. Le châssis, la cuve (le cas échéant), le circuit magnétique (s'il est prévu de le mettre à la terre) et toutes les bornes du ou des enroulements secondaires doivent être reliés à la terre.

Pour les transformateurs de courant triphasé destinés à des sous-stations à isolation gazeuse, chaque phase doit être soumise à l'essai individuellement. Lors de l'essai de chaque phase, les autres phases doivent être reliées à la terre.

Pour les critères d'acceptation des transformateurs sous enveloppe métallique à isolation gazeuse, se référer à l'Article 6.2.4 de la CEI 62271-203:2011.

7.2.6 Essais concernant la précision

7.2.6.201 Essai d'erreur de rapport et de déphasage des transformateurs de courant pour mesure

Pour prouver la conformité avec les paragraphes 5.6.201.3, 5.6.201.4 et 5.6.201.5, des mesures de la précision doivent être effectuées à chaque valeur de courant donnée respectivement dans le Tableau 201, le Tableau 202 et le Tableau 203, à la valeur la plus élevée et à la valeur la plus basse de la gamme de charge spécifiée.

Les transformateurs de courant à gamme de courant étendue doivent être soumis à l'essai avec le courant primaire étendu assigné au lieu de 120 % du courant assigné.

7.2.6.202 Détermination du facteur de sécurité (FS) pour les transformateurs de courant pour mesure

Il est permis d'effectuer un essai en utilisant la méthode d'essai indirect suivante:

L'enroulement primaire étant en circuit ouvert, l'enroulement secondaire est excité à la fréquence assignée par une tension pratiquement sinusoïdale. La tension doit être augmentée jusqu'à ce que le courant d'excitation I_e atteigne $I_{sr} \times FS \times 10\%$.

La valeur efficace de la tension obtenue aux bornes doit être inférieure à la force électromotrice limite secondaire E_{FS} (voir 3.4.206).

La tension d'excitation doit être mesurée avec un appareil qui donne une réponse proportionnelle à la valeur moyenne du signal redressé, mais est gradué en valeur efficace. Le courant d'excitation doit être mesuré à l'aide d'un appareil de mesure de valeur efficace ayant un facteur de crête de 3.

S'il convient de mettre en doute le résultat de la mesure, une mesure plus approfondie doit être effectuée par le biais d'un essai direct (voir Annexes 2A.5 et 2A.6) pour vérifier le résultat. Le résultat de l'essai direct devient alors la référence.

NOTE L'essai indirect présente le grand avantage de ne nécessiter ni courants élevés (par exemple, 30 000 A pour un courant primaire assigné de 3 000 A et un facteur de sécurité pour les appareils de 10), ni charges conçues pour supporter un courant de 50 A. Lors de l'essai indirect, l'effet dû aux conducteurs primaires de retour n'intervient pas physiquement. En service, cet effet peut seulement majorer l'erreur composée, ce qui est souhaitable pour la sécurité de l'appareil alimenté par le transformateur de courant pour mesure.

7.2.6.203 Essai d'erreur composée des transformateurs de courant pour protection de classes P et PR

Les deux procédures d'essai suivantes sont données:

a) La conformité avec les limites de l'erreur composée indiquées dans le Tableau 205 doit être prouvée par un essai direct pendant lequel on fait passer dans l'enroulement primaire un courant pratiquement sinusoïdal, égal au courant limite de précision assigné, le secondaire étant connecté à une charge de valeur égale à la charge assignée. Le facteur de puissance de la charge d'essai doit être choisi par le constructeur entre 0,8 (circuit inductif) et 1,0, quelle que soit la charge assignée (voir Annexes 2A.4, 2A.5, 2A.6 et 2A.7).

   Il est permis d'effectuer l'essai sur un transformateur similaire au transformateur fourni, l'isolation pouvant être réduite, pourvu que la disposition géométrique soit la même dans les deux cas.

   Dans le cas de courants primaires très élevés et de transformateurs de courant à barre primaire, il convient de tenir compte de la distance entre le conducteur de retour du primaire et le transformateur de courant afin de reproduire autant que possible les conditions de service.

b) Pour les transformateur de courant à faible réactance de fuite selon l'Annexe 2C, il est permis de remplacer l'essai direct par l'essai indirect suivant:

L'enroulement primaire étant en circuit ouvert, l'enroulement secondaire est excité à la fréquence assignée par une tension pratiquement sinusoïdale de valeur efficace égale à la force électromotrice limite secondaire E_{ALF}.

Le courant d'excitation ainsi obtenu, exprimé en pourcentage de $I_{sr} \times ALF$ ne doit pas dépasser la limite de l'erreur composée indiquée au Tableau 205.

La tension d'excitation doit être mesurée avec un appareil qui donne une réponse proportionnelle à la valeur moyenne du signal redressé, mais est gradué en valeur efficace. Le courant d'excitation doit être mesuré à l'aide d'un appareil de mesure de valeur efficace ayant un facteur de crête de 3.

Lors de la détermination de l'erreur composée par la méthode indirecte, il n'est pas nécessaire de tenir compte d'une éventuelle correction du rapport des nombres de spires.

7.2.6.204 Détermination de l'erreur aux conditions limites des transformateurs de courant pour protection de classes TPX, TPY et TPZ

L'objectif de cet essai de type est de prouver la conformité avec les exigences aux conditions limites. Pour les méthodes d'essai, se référer à l'Annexe 2B.

Si le transformateur de courant est du type à faible réactance de fuite selon l'Annexe 2C, un essai indirect peut être effectué selon 2B.2, sinon un essai direct doit être effectué selon 2B.3.

L'essai peut être effectué sur un modèle en grandeur réelle de la partie active du transformateur de courant, avec toutes les enveloppes métalliques, mais sans isolation.

7.2.6.205 Essai des transformateurs de courant du type à faible réactance de fuite pour classes de protection PX et PXR

La preuve qu'il s'agit d'un transformateur de courant à faible réactance de fuite doit être établie selon l'Annexe 2C.

7.2.6.206 Détermination du facteur de rémanence des transformateurs de courant pour classes de protection PR, TPY et PXR

Le facteur de rémanence (K_R) doit être déterminé pour les transformateurs de courant des classes suivantes, afin de prouver leur conformité avec les articles correspondants:

Classe PR: Article 5.6.202.3.5,

Classe PXR: Article 5.6.202.5.2,

Classe TPY: Article 5.6.202.4.

Pour les méthodes d'essai, se référer à l'Annexe 2B.2.

7.2.201 Essais de tenue aux courants de courte durée

Pour vérifier la conformité avec les exigences de courant de court-circuit thermique assigné et de courant dynamique assigné données au paragraphe 5.204, les deux essais suivants sont spécifiés.

L'essai thermique doit être réalisé avec le ou les enroulements secondaires mis en court-circuit, à un courant I' et pendant un temps t' tels que

$$I'^2 \times t' \geq I_{th}^2 \times t$$

où t est est la valeur de la durée du courant de court-circuit thermique.

La valeur de t' soit comprise entre 0,5 s et 5 s.

L'essai dynamique doit être effectué aussi avec le ou les enroulements secondaires mis en court-circuit et avec un courant primaire dont la valeur de crête est supérieure ou égale au courant dynamique assigné (I_{dyn}), pendant au moins une crête.

Il est permis de combiner l'essai dynamique avec l'essai thermique ci-dessus, à condition que le premier courant de crête principal soit supérieur ou égal au courant dynamique assigné (I_{dyn}).

On doit considérer que le transformateur a réussi ces essais si, une fois revenu à température ambiante (entre 10 °C et 40 °C), il satisfait aux exigences suivantes:

a) il n'est pas endommagé de manière apparente;

b) ses erreurs après démagnétisation ne diffèrent pas de celles relevées avant les essais de plus de la moitié des limites d'erreur correspondant à sa classe de précision;

c) il supporte les essais diélectriques spécifiés aux paragraphes 7.3.1, 7.3.2, 7.3.3 et 7.3.4, mais avec des tensions ou des courants d'essai réduits à 90 % de ceux qui sont indiqués;

d) l'examen de l'isolation à proximité de la surface du conducteur ne révèle aucune détérioration sensible (par exemple, une carbonisation).

L'examen d) n'est pas requis si la densité du courant dans l'enroulement primaire, correspondant au courant de court-circuit thermique assigné (I_{th}), ne dépasse pas:

– 180 A/mm^2, lorsque l'enroulement est en cuivre de conductivité supérieure ou égale à 97 % de la valeur indiquée dans la CEI 60028;

– 120 A/mm^2, lorsque l'enroulement est en aluminium de conductivité supérieure ou égale à 97 % de la valeur indiquée dans la CEI 60121.

NOTE L'expérience montre qu'en service, les exigences concernant le courant thermique sont généralement satisfaites pour une isolation de classe A, à condition que la densité du courant dans l'enroulement primaire, correspondant au courant de court-circuit thermique assigné, ne dépasse pas les valeurs susmentionnées.

7.3 Essais individuels de série

7.3.1 Essais de tenue à la tension à fréquence industrielle sur les bornes primaires

Le présent article de la CEI 61689-1 s'applique avec les compléments suivants:

La tension d'essai doit être appliquée entre l'enroulement primaire mis en court-circuit et la terre. Le ou les enroulements secondaires mis en court-circuit, le châssis, la cuve (le cas échéant) et le circuit magnétique (s'il y a une borne spéciale de mise à la terre) doivent être reliés à la terre.

7.3.5 Essais concernant la précision

7.3.5.201 Essais d'erreur de rapport et de déphasage des transformateurs de courant pour mesure

L'essai individuel de série visant à déterminer la précision est en principe le même que l'essai de type décrit au paragraphe 7.2.6.201; cependant, des essais individuels de série avec un nombre réduit de courants et/ou de charges sont autorisés, sous réserve que des essais de type sur un transformateur analogue aient montré que ce nombre d'essais réduit suffit pour prouver la conformité avec le paragraphe 5.6.201.3.

7.3.5.202 Essais d'erreur de rapport et de déphasage des transformateurs de courant pour protection de classes P et PR

Des essais doivent être effectués au courant primaire assigné, la charge secondaire étant égale à la charge assignée, afin de prouver la conformité avec les paragraphes 5.6.202.2 et 5.6.202.3, respectivement, en ce qui concerne l'erreur de rapport et le déphasage.

7.3.5.203 Essai d'erreur composée des transformateurs de courant pour protection de classes P et PR

Pour les transformateur de courant à faible réactance de fuite (voir l'Annexe 2C), l'essai individuel de série est le même que l'essai indirect de type spécifié au point b) du paragraphe 7.2.6.203.

Pour les autres transformateurs, l'essai indirect spécifié au point b) du paragraphe 7.2.6.203 peut être utilisé, mais on doit appliquer au courant d'excitation un facteur de correction. Ce facteur est obtenu par comparaison entre les résultats des essais direct et indirect réalisés sur un transformateur de même type que le transformateur à l'essai, avec le même facteur limite de précision et les mêmes conditions de charge. Dans ces cas, il convient que le constructeur tienne à disposition un certificat d'essai.

NOTE 1 Le facteur de correction est égal au rapport entre l'erreur composée obtenue par la méthode directe et le courant d'excitation, exprimé en pourcentage de I_{sr} x ALF déterminé par la méthode indirecte.

NOTE 2 L'expression «transformateur du même type» implique que la force magnétomotrice (ampères-tours) soit la même, indépendamment du rapport de transformation, et que les enroulements secondaires ainsi que les agencements géométriques et les matériaux du circuit magnétique soient identiques.

7.3.5.204 Essai d'erreur de rapport et de déphasage des transformateurs de courant pour protection de classes TPX, TPY et TPZ

L'erreur de rapport et le déphasage doivent être mesurés au courant assigné pour prouver la conformité avec le paragraphe 5.6.202.5.1.

Les résultats doivent correspondre à une température de l'enroulement secondaire de 75 °C.

La valeur réelle de la température de l'enroulement secondaire doit donc être mesurée et la différence par rapport à sa valeur ramenée à 75 °C doit être déterminée. La mesure de l'erreur doit être effectuée avec la charge R_b majorée de la différence de résistance d'enroulement mentionnée ci-dessus.

En variante, pour les circuits magnétiques TPY et TPZ, il est permis de déterminer le déphasage à 75 °C ($\Delta\varphi_{75}$) par une mesure à température ambiante ($\Delta\varphi_{amb}$) et le calcul suivant:

$$\Delta\varphi_{75} = \Delta\varphi_{amb} \frac{R_{ct} + R_b}{R_{ctamb} + R_b}$$

où R_{ctamb} est la résistance de l'enroulement à température ambiante. L'erreur de rapport n'est pas affectée par cette correction de résistance.

Pour l'essai de type et l'essai individuel de série, une méthode d'essai directe (utilisant une source de courant primaire et un transformateur de courant de référence) doit être appliquée.

Pour les transformateurs de courant à faible réactance de fuite, une méthode d'essai indirecte est donnée à l'Annexe 2E. Il est permis d'appliquer cette méthode aux mesures sur site et à la surveillance.

7.3.5.205 Détermination de l'erreur dans les conditions limites des transformateurs de courant pour protection de classes TPX, TPY et TPZ

L'objectif de cet essai individuel de série est de prouver la conformité avec les exigences aux conditions limites.

Si le transformateur de courant est du type à faible réactance de fuite selon l'Annexe 2C, un essai indirect doit être effectué selon 2B.2.

Si la conformité avec les exigences de limites de type à faible réactance de fuite ne peut être établie, mais si un essai de type du même type est à disposition, un essai indirect doit être effectué selon 2B.2. Dans ce cas, on doit prendre en compte le facteur de construction éventuellement disponible F_C s'il est supérieur à 1,1. Si un tel essai de type n'est pas disponible, un essai de type doit être effectué avec une pièce du lot de fabrication. Le résultat de cet essai devient alors la référence pour l'essai indirect des autres pièces.

NOTE 1 Pour déterminer le facteur F_C, les laboratoires doivent prendre en compte une grande incertitude de mesure à cause de la nécessité d'intégrer la force électromotrice, et à cause des paramètres non-linéaires aux conditions limites. De plus, seulement quelques laboratoires peuvent réaliser les cycles de fonctionnement demandés. En conséquence, les résultats des essais directs et indirects ne correspondent pas bien, et peut résulter en des valeurs de F_c non fiables. Cependant, une petite expérience existe dans ce domaine.

NOTE 2 L'expression «transformateur du même type» implique que la force magnétomotrice (ampères-tours) soit similaire, indépendamment du rapport de transformation, et que les matériaux et l'arrangement du noyau et de l'enroulement secondaire sont identiques.

7.3.5.206 Détermination du rapport du nombre de spires des transformateurs de courant pour protection de classes PX et PXR

Pour les classes PX et PXR, le rapport du nombre de spires doit être déterminé conformément à l'Annexe 2F.

Il est permis de remplacer cet essai par une mesure de l'erreur de rapport avec une charge nulle, sous réserve d'accord entre le constructeur et l'acheteur.

Le rapport du nombre de spires ne doit pas dépasser la limite selon 5.6.202.4.

7.3.201 Détermination de la résistance de l'enroulement secondaire (R_{ct})

La résistance de l'enroulement secondaire (R_{ct}) doit être mesurée sur les transformateurs de courant des classes suivantes, afin de prouver leur conformité avec les articles correspondants:

Classe PR:	Articles 5.6.202.3.7 et 6.13.202.4 (si le paramètre est spécifié)
Classe PX, PXR:	Articles 5.6.202.4 et 6.13.202.5
Classes TPX, TPY, TPZ:	Article 6.13.202.6

La valeur mesurée doit être corrigée à une température de 75°C ou à la température qui est spécifiée.

Pour les classes PR, PX et PXR, la valeur résultante après la correction à 75°C ne doit pas dépasser la limite maximale spécifiée (si définie).

7.3.202 Détermination de la constante de temps de la boucle secondaire (T_s)

La constante de temps de la boucle secondaire (T_s) doit être déterminée pour les transformateurs de courant des classes suivantes, afin de prouver leur conformité avec les articles correspondants:

Classes PR: Article 5.6.202.3.6 (si le paramètre est spécifié)

Classes TPY: Article 5.6.202.5.3

Sa valeur ne doit pas différer de quelconque valeur spécifiée de plus de ± 30 %.

T_s sera déterminée selon la l'équation suivante (Détermination de L_m: voir 2B.2):

$$T_S = \frac{L_m}{(R_{ct} + R_b)}$$

Dans les cas où la charge correspond à la puissance de sortie assignée, exprimée en VA, R_b est considérée comme étant égal à la partie résistive de la charge.

Il est également permis de déterminer T_s selon l'équation suivante:

$$T_S = \frac{1}{2\pi f_R \times \tan(\Delta\varphi)}$$

Si le déphasage $\Delta\varphi$ est exprimé en minutes, on peut appliquer la formule d'approximation suivante:

$$T_S[s] = \frac{3438}{2\pi f_R \times \Delta\varphi \ [min]}$$

NOTE 1 La méthode utilisant Δφ peut provoquer des difficultés pour les transformateurs à rapport élevé et faible déphasage en raison de l'incertitude de la mesure d'un faible déphasage.

NOTE 2 Pour les noyaux de la classe TPZ, il n'est pas nécessaire d'indiquer T_s . L'exigence de précision Δφ = (180 ± 18) min est vérifiée comme essai individuel de série. La formule susmentionnée fournit la valeur de T_s.

7.3.203 Essai pour la force électromotrice de coude assignée (E_k) et le courant d'excitation à E_k

La force électromotrice de coude assignée (E_k) doit être vérifiée et le courant d'excitation I_e doit être mesuré sur les transformateurs de courant des classes suivantes, afin de prouver leur conformité avec les articles correspondants:

Classe PX, PXR: Article 5.6.202.4

Une tension d'excitation sinusoïdale adéquate, à la fréquence assignée, doit être appliquée aux bornes secondaires de l'enroulement secondaire complet du transformateur, toutes les autres bornes étant en circuit ouvert, et le courant d'excitation doit être mesuré.

La tension d'excitation doit être mesurée avec un appareil qui donne une réponse proportionnelle à la valeur moyenne du signal redressé, mais est gradué en valeur efficace. Le courant d'excitation doit être mesuré à l'aide d'un appareil de mesure de valeur efficace ayant un facteur de crête de 3.

La caractéristique d'excitation doit être tracée au moins jusqu'à 1.1 x E_k.

La condition du point de coude définie en 3.4.215 doit être satisfaite à une tension égale à la force électromotrice de coude E_k.

Le courant d'excitation I_e à une tension égale à E_k (ou à tout pourcentage donné), ne doit pas dépasser la valeur spécifiée.

NOTE 1 Pour les transformateurs de courant à rapport de transformation sélectionnable par des prises sur l'enroulement secondaire, il est permis de calculer la caractéristique d'excitation pour les rapports différents du rapport maximal. Pour chaque point de mesure, les équations suivantes peuvent être appliquées:

$$E_2 = E_1 \times \frac{k_{r2}}{k_{r1}}$$

$$I_{e2} = I_{e1} \times \frac{k_{r1}}{k_{r2}}$$

où k_{r1}, k_{r2} sont les deux rapports de transformation;

E_1, E_2 sont les deux forces électromotrices adéquates;

I_{e1}, I_{e2} sont les deux courants d'excitation adéquates.

NOTE 2 Le nombre de points de mesure peut être convenu entre le constructeur et l'acheteur.

NOTE 3 Normalement, la force électromotrice du point de coude réel est déterminée et doit être supérieure à la force électromotrice de coude assignée.

7.3.204 Essai de surtension entre spires

Des essais doivent être effectués afin de prouver la conformité avec le paragraphe 5.3.201.

L'essai de surtension entre spires doit être effectué sur l'enroulement secondaire complet selon l'une des procédures suivantes. Sauf convention contraire, le choix de la procédure est laissé au constructeur.

Procédure A: les enroulements secondaires étant en circuit ouvert (ou connectés à un dispositif à haute impédance qui mesure la tension de crête), un courant pratiquement sinusoïdal, de fréquence comprise entre 40 Hz et 60 Hz et de valeur efficace égale au courant primaire assigné (ou au courant primaire étendu assigné, si spécifié), doit être appliqué pendant 60 s à l'enroulement primaire.

Le courant appliqué doit être limité si l'on obtient la tension d'essai donnée au paragraphe 5.3.201 avant d'atteindre le courant primaire assigné (ou le courant primaire étendu assigné).

Si la tension d'essai donnée au paragraphe 5.3.201 n'est pas atteinte au courant primaire maximum, la tension obtenue doit être considérée comme la tension d'essai.

Procédure B: l'enroulement primaire étant en circuit ouvert, la tension d'essai donnée au paragraphe 5.3.201 (à une fréquence d'essai adéquate) doit être appliquée pendant 60 s aux bornes de chaque enroulement secondaire.

La valeur efficace du courant secondaire ne doit pas dépasser le courant secondaire assigné (ou la valeur étendue correspondante, si spécifié).

La fréquence d'essai choisie doit permettre d'atteindre la tension d'essai, mais ne doit pas dépasser 400 Hz.

Si la tension d'essai donnée au paragraphe 5.3.201 n'est pas atteinte au courant secondaire maximum et à la fréquence d'essai maximum, la tension obtenue doit être considérée comme la tension d'essai.

Lorsque la fréquence d'essai dépasse deux fois la fréquence assignée, la durée de l'essai t doit être réduite comme suit:

$$t = 120\,\text{s} \times \frac{f_R}{f_T}$$

où

f_R est la fréquence assignée;
f_T est la fréquence d'essai;

avec un t minimum de 15 s.

NOTE L'essai de surtension entre spires n'est pas destiné à vérifier l'adéquation d'un transformateur de courant au fonctionnement avec l'enroulement secondaire en circuit ouvert. Il convient de ne pas faire fonctionner les transformateurs de courant avec l'enroulement secondaire en circuit ouvert en raison des surtensions et des échauffements potentiellement dangereux qui peuvent apparaître.

7.4 Essais spéciaux

7.4.3 Mesure de la capacité et du facteur de dissipation diélectrique

L'article de la CEI 61869-1:2007 s'applique avec les compléments suivants:

La tension d'essai doit être appliquée entre les bornes de l'enroulement primaire mis en court-circuit et la terre. En général, les bornes de l'enroulement ou des enroulements secondaires mis en court-circuit, tout écran et la carcasse métallique isolée doivent être reliés à l'appareil de mesure. Si le transformateur de courant comporte une borne spéciale adaptée à cette mesure, les autres bornes à basse tension doivent être mises en court-circuit et reliées, de même que la carcasse métallique, à la terre ou à l'écran de l'appareil de mesure.

L'essai doit être effectué avec le transformateur de courant à température ambiante, et la valeur de cette température doit être enregistrée.

7.4.6 Essai de défaut d'arc interne

L'article de la CEI 61869-1:2007 s'applique, en y ajoutant la note suivante:

NOTE Pour les transformateurs de courant immergés dans l'huile avec partie active en tête, la zone d'origine des défauts en service se situe souvent dans la partie supérieure de l'isolation principale. Pour les transformateurs de courant de type épingle à cheveux immergés dans l'huile, cette zone se situe généralement dans la partie inférieure de l'isolation principale.

7.5 Essais sur prélèvements

7.5.1 Détermination du facteur de rémanence

Normalement, un essai sur prélèvement est répété pour chaque série de production, selon l'essai de type 7.2.6.206.

7.5.2 Détermination du facteur de sécurité (FS) pour les transformateurs de courant pour mesure

Normalement, un essai sur prélèvement est répété pour chaque série de production, selon l'essai de type 7.2.6.202.

Annexe 2A
(normative)

Transformateurs de courant pour protection de classes P et PR

2A.1 Diagramme vectoriel

Si l'on admet que le transformateur de courant ainsi que sa charge puissent être assimilés à un système électromagnétique linéaire, un courant primaire de forme sinusoïdale déterminera des courants, tensions et flux magnétique qui seront également sinusoïdaux, et le fonctionnement du transformateur pourra se représenter par le diagramme vectoriel de la Figure 2A.1.

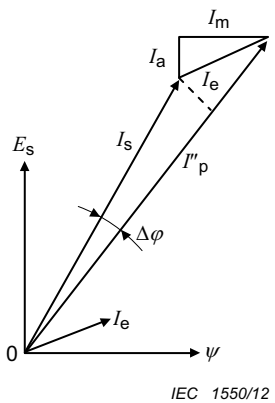


Figure 2A.1 – Diagramme vectoriel

Dans la Figure 2A.1, I_s représente le courant secondaire. Il traverse l'enroulement et la charge secondaire et détermine en grandeur et phase la force électromotrice E_s qui doit être induite dans l'enroulement secondaire, laquelle à son tour détermine le flux embrassé par l'enroulement secondaire ψ en quadrature sur E_s. Le flux est produit par les ampères-tours résultant des enroulements primaire et secondaire ou de façon équivalente par le courant d'excitation secondaire I_e, lui-même somme vectorielle d'un courant magnétisant I_m parallèle à ψ et d'une composante active I_a, (répondant aux pertes) parallèle à E_s. La somme vectorielle des courants I_s et I_e est le vecteur I''_p qui représente le courant primaire multiplié par le rapport d'enroulement réel (c'est-à-dire par le rapport entre les nombres de spires primaires et secondaires).

Il en résulte que pour un transformateur dont le rapport du nombre de spires est inverse au rapport de transformation assigné, la différence entre les longueurs des vecteurs I_s et I''_p rapportées à I''_p fournit l'erreur de courant (telle que définie en 3.4.3) tandis que l'écart angulaire $\Delta\varphi$ entre les vecteurs I_s et I''_p est le déphasage (défini en 3.4.4).

2A.2 Correction de spires

Lorsque l'inverse du rapport du nombre de spires est différent du rapport de transformation assigné (le premier est généralement plus petit) on dit qu'il y a une correction de spires. Il importe alors d'établir une distinction entre I''_p, le courant primaire multiplié par le rapport d'enroulement réel et I'_p, le courant primaire divisé par le rapport de transformation assigné. L'absence d'une correction de spires signifie que $I'_p = I''_p$. S'il existe une correction de spires, I'_p est différent de I''_p et on voit facilement que la correction de spires influe sur l'erreur de courant (et peut être utilisée à cet effet), étant donné que I''_p figure dans le diagramme

vectoriel et I'_p intervient pour la détermination de l'erreur de courant. Cependant, les vecteurs I'_p et I''_p ayant la même direction, la correction de spires n'affecte pas le déphasage.

Il apparaît aussi que l'influence de la correction de spires est plus faible sur l'erreur composée que sur l'erreur de rapport (ε).

2A.3 Triangle d'erreur

Sur la Figure 2A.2, la partie supérieure de la Figure 2A.1 est redessinée à plus grande échelle et avec l'hypothèse que l'angle de phase est assez petit pour que l'on puisse considérer que les deux vecteurs I_s et I''_p sont parallèles. Supposant aussi l'absence de correction de spires, on obtient l'erreur de rapport (ε) avec une bonne approximation en projetant I_e sur I_p et en utilisant la composante (ΔI) de I_e en phase avec I''_p au lieu de la différence arithmétique entre I''_p et I_s. De même, la composante (ΔI_q) de I_e en quadrature peut être utilisée pour exprimer l'erreur de phase.

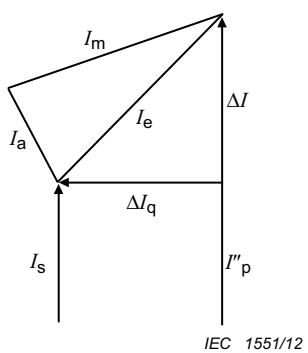


Figure 2A.2 – Triangle d'erreur

On peut en outre voir qu'avec les mêmes hypothèses, le courant d'excitation I_e divisé par I''_p est égal à l'erreur composée selon le paragraphe 3.4.203.

En définitive, pour un transformateur de courant sans correction de spires, pourvu que la représentation vectorielle soit valable, l'erreur de rapport (ε), le déphasage et l'erreur composée peuvent être représentés par les trois côtés d'un triangle rectangle.

Dans ce triangle, l'hypoténuse qui représente l'erreur composée et dépend de l'impédance totale constituée de la charge et de l'enroulement secondaire (somme vectorielle), tandis que la décomposition en erreur de rapport (ε) et en déphasage dépend du facteur de puissance de cette impédance totale et de celui du courant d'excitation. On obtient une erreur de phase nulle lorsque ces deux facteurs de puissance sont égaux, i.e. quand I_s et I_e sont en phase.

2A.4 Erreur composée

La considération de l'erreur composée est surtout intéressante dans le cas où la représentation vectorielle n'est pas applicable du fait de la présence d'harmoniques dans le courant secondaire et dans le courant d'excitation (voir Figure 2A.3).

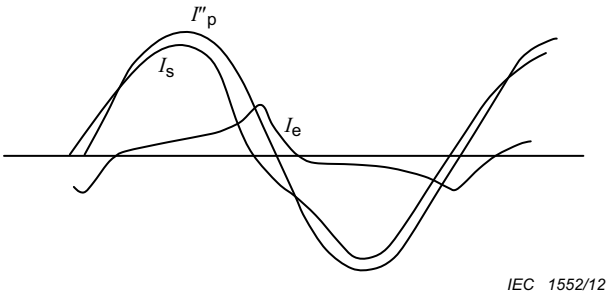


Figure 2A.3 – Forme d'onde typique

C'est la raison pour laquelle l'erreur composée est définie au paragraphe 3.4.203 et non, de manière bien plus simple, par la somme vectorielle de l'erreur de rapport (ε) et du déphasage, comme illustré à la Figure 2A.2.

Il en résulte également que l'erreur composée englobe l'effet propre de la présence d'harmoniques dans le courant secondaire, alors que le courant primaire en est exempt, présence d'harmoniques qui constitue déjà par elle-même un écart dans le comportement de l'appareil par rapport à un transformateur de courant idéal (le courant primaire est toujours supposé sinusoïdal dans la présente norme).

2A.5 Méthode directe de mesure de l'erreur composée

La méthode normale est donnée par l'enregistrement numérique des formes d'onde des courants primaire et secondaire, suivi par le calcul de l'erreur composée, utilisant la méthode d'intégration numérique selon la définition donnée en 3.4.203.

Néanmoins, dans cette annexe, les méthodes traditionnelles pour la détermination de l'erreur composée avec des instruments analogiques sont décrites.

La Figure 2A.4 représente le schéma de principe de la méthode de mesure directe pour un transformateur dont le rapport d'enroulement est égal à l'unité. La source est supposée fournir un courant primaire sinusoïdal et l'enroulement secondaire (relié à la charge Z_B qui a des caractéristiques linéaires) est raccordé de telle manière que l'ampèremètre A est traversé par la différence des courants primaire et secondaire. La valeur efficace que cet appareil mesure est donc celle du courant d'excitation, et son rapport (exprimé en pour-cent) à la valeur efficace du courant primaire fournit l'erreur composée telle que définie au paragraphe 3.4.203, compte tenu des conditions actuelles.

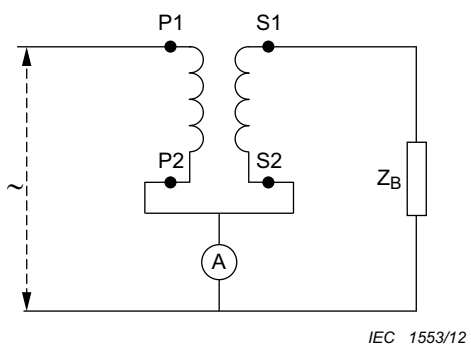


Figure 2A.4 – Circuit de base pour transformateur de courant 1:1

La Figure 2A.4 représente donc le schéma de principe pour la mesure directe de l'erreur composée.

La Figure 2A.5, représente le schéma de principe de la méthode de mesure directe étendu au cas d'un transformateur de rapport de transformation différent de l'unité. Dans ce schéma, N est un transformateur de même rapport de transformation assigné que le transformateur X essayé. Ce transformateur N doit avoir une erreur composée négligeable dans les conditions de l'essai (sa charge se réduit pratiquement à l'ampèremètre A_1). Le transformateur X est raccordé à sa charge assignée Z_B et les enroulements secondaires de N et de X sont branchés de telle sorte que l'ampèremètre A_2 mesure la différence de leurs courants.

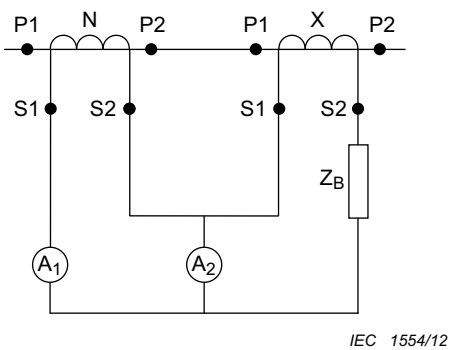


Figure 2A.5 – Circuit de base pour transformateur de rapport quelconque

Les deux circuits primaires sont alimentés par la même source de courant sinusoïdal. Dans ces conditions, le rapport (exprimé en pour-cent) de la valeur efficace du courant mesuré par l'ampèremètre A_2 à celle mesurée par l'ampèremètre A_1 fournit l'erreur composée du transformateur X.

Il est à remarquer que le caractère négligeable de l'erreur composée de N est requis dans cette méthode. Il n'est en effet pas suffisant que cette erreur composée soit connue car du fait même de sa complexité (notamment du fait des déformations d'onde) les corrections voulues ne pourraient pas être apportées.

2A.6 Autre méthode de mesure directe de l'erreur composée

D'autres méthodes directes de détermination de l'erreur composée peuvent être utilisées pour mesurer l'erreur composée et une méthode est illustrée à la Figure 2A.6.

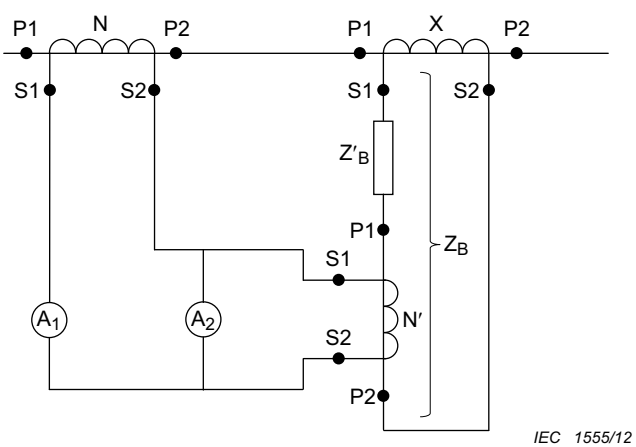


Figure 2A.6 – Variante de circuit d'essai

La méthode schématiquement représentée par la Figure 2A.6 , présente sur celle illustrée par la Figure 2A.5 l'avantage de ne pas exiger l'emploi d'un transformateur de précision spécial. Dans cette méthode en effet, le transformateur N, de même rapport que X, doit présenter une erreur composée négligeable sous le courant limite de précision assigné du transformateur X tandis que la méthode représentée par la Figure 2A.6 ne soumet les transformateurs de précision N et N′ qu'à des courants de l'ordre de leurs courants assignés. Il reste bien entendu essentiel que leurs erreurs composées soient négligeables dans les conditions de l'essai mais l'exigence devient plus facile à satisfaire.

Dans la Figure 2A.6, X est le transformateur sous essai. N est un transformateur de précision dont le courant primaire assigné est choisi voisin du courant limite de précision assigné du transformateur X (c'est-à-dire de la valeur du courant primaire sous lequel l'essai doit être entrepris). L'appareil N′ est un transformateur de précision dont le courant primaire assigné doit être de l'ordre de grandeur du courant secondaire de X correspondant au courant (primaire) limite de précision assigné. Il ne faut pas perdre de vue que ce transformateur N′ fait partie intégrante de la charge Z_B du transformateur X et qu'il faut donc en tenir compte lors de la détermination de l'impédance Z'_B. A_1 et A_2 sont deux ampèremètres et il y a lieu de s'assurer que A_2 mesure bien la différence des courants secondaires des transformateurs N et N′.

Si les rapports de transformation assignés des transformateurs N, N′ et X sont respectivement désignés par k_r, k_{rx} et k'_r, le rapport k_r doit être égal au produit de k'_r par k_{rx}:

$$k_r = k'_r \times k_{rx}$$

Dans ces conditions, le rapport (exprimé en pour-cent) des valeurs efficaces des courants mesurés par les ampèremètres A_1 et A_2 fournit l'erreur composée du transformateur X.

NOTE Lors de l'utilisation des circuits de mesure illustrés par les Figure 2A.5 et Figure 2A.6, il y a lieu de veiller à ce que la puissance absorbée par l'ampèremètre A_2 reste suffisamment faible. La chute de tension sur cet ampèremètre (divisée par le rapport de transformation du transformateur N′ dans le cas de la Figure 2A.6) vient en effet se composer avec la tension sur la charge Z_B et modifie en conséquence la charge effective du transformateur X (elle tend en fait à la réduire). Par ailleurs, cette même chute de tension sur A_2 représente un accroissement de la charge effective du transformateur N.

2A.7 Emploi de l'erreur composée

L'erreur composée sera toujours supérieure ou égale à la racine carrée de la somme des carrés de l'erreur de de rapport (ε) et du déphasage (ce dernier étant exprimé en centiradians).

Il en résulte que l'erreur composée est toujours une limite supérieure aussi bien de l'erreur de rapport (ε) que du déphasage.

L'erreur de rapport (ε) intéresse surtout les relais de surcharge; les déphasages intéressent surtout les relais sensibles à la phase (exemple: les relais directionnels).

Dans le cas des relais différentiels, c'est la combinaison des erreurs composées des transformateurs de courant qui doit être prise en considération.

Un avantage supplémentaire de la limitation de l'erreur composée réside dans la limitation résultante de la teneur en harmoniques du courant secondaire, qui est nécessaire pour le bon fonctionnement de certains types de relais.

Annexe 2B
(normative)

Classes de transformateurs de courant pour protection pour réponse en régime transitoire

2B.1 Equations théoriques fondamentales relatives au dimensionnement pour le régime transitoire

2B.1.1 Court-circuit

Les équations suivantes correspondent au cycle de fonctionnement C-O. Pour les cycles de fonctionnement C-O-C-O voir 2B.1.3

L'expression générale de la valeur instantanée d'un courant de court-circuit peut s'écrire:

$$i_{\mathrm{k}}(t) = \sqrt{2}\ I_{\mathrm{psc}}\left[e^{-\mathrm{t/T_p}}\ \cos(\gamma - \varphi) - \cos(\omega\, t + \gamma - \varphi)\right] \tag{2B.1}$$

où

I_{psc} est le courant alternatif de court-circuit initial à la limite de précision du transformateur de courant $I_{\mathrm{psc}} = K_{\mathrm{ssc}} \times I_{\mathrm{pr}}$;

$T_{\mathrm{p}} = \dfrac{L_{\mathrm{p}}}{R_{\mathrm{p}}}$ est la constante de temps du primaire;

γ est l' angle d'enclenchement ou d'apparition du défaut;

$\varphi = \arctan\dfrac{X_{\mathrm{p}}}{R_{\mathrm{p}}} = \arctan\left(\omega\, T_{\mathrm{p}}\right)$ est l' angle de phase de l'impédance de court-circuit du système;

ω est la pulsation $2\pi f_{\mathrm{R}}$;

lorsque la source de tension équivalente dans le court-circuit avec R_{p} et X_{p} est

$$u(t) = -U_{\mathrm{max}}\ \cos(\omega\, t + \gamma) \tag{2B.2}$$

Pour simplifier, l'angle d'apparition du défaut et l'angle d'impédance du système peuvent être additionnés en un seul angle, ce qui rend le calcul plus facile à comprendre du point de vue mathématique.

$$\theta = \gamma - \varphi \tag{2B.3}$$

$$i_{\mathrm{k}}(t) = \sqrt{2}\ I_{\mathrm{psc}}\left[e^{-\mathrm{t/T_p}}\ \cos(\theta) - \cos(\omega\, t + \theta)\right] \tag{2B.4}$$

Les angles θ et γ décrivent tous les deux la possibilité de la variation de l'angle d'enclenchement. Ils peuvent donc être également utilisés lorsqu'ils sont appropriés, mais en fonction de leur définition.

La Figure 2B.1 représente deux courants de court-circuit primaire types. Le premier apparaît à un angle d'apparition de défaut $\gamma = 90°$, ce qui conduit au courant de crête le plus élevé et au flux de crête embrassé par l'enroulement secondaire le plus élevé pour un t'_{al} long (voir Figure 2B.2), tandis que le second apparaît à $\gamma = 140°$, ce qui conduit à une asymétrie moindre. Cependant, pour un t'_{al} court, ce dernier cas conduit à un courant et un flux plus élevé que dans le cas du courant de crête le plus grand.

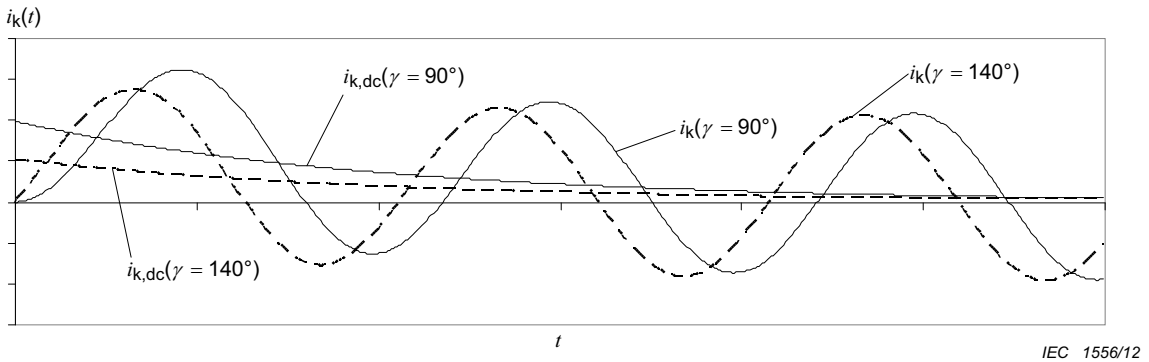


Figure 2B.1 – Courants de court-circuit présentant la crête la plus élevée (γ = 90°) et présentant une asymétrie inférieure (γ = 140°)

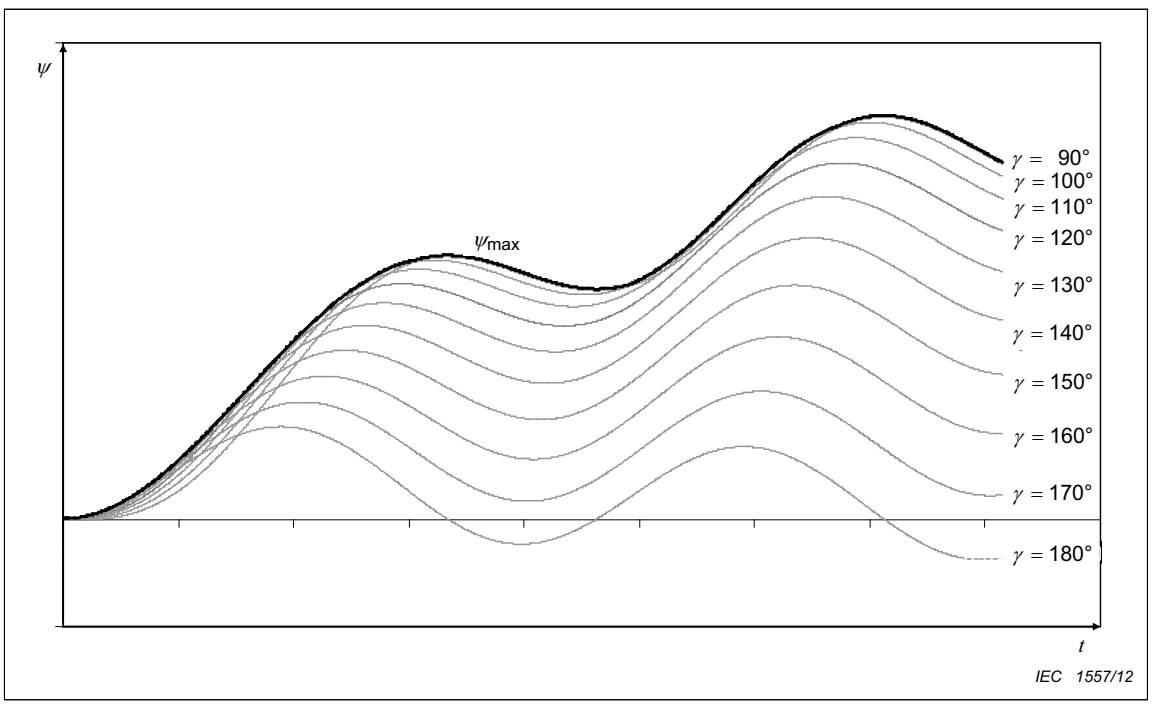


Figure 2B.2 – La courbe $\psi_{max}(t)$, composée des valeurs de flux les plus élevées, considérant tous les angles d'enclenchement γ appréciables

Il est possible d'utiliser une plage d'angle d'apparition de défaut éventuellement réduite pour définir une asymétrie réduite, ce qui peut aboutir à un facteur K_{td} réduit dans certains cas particuliers.

NOTE La possibilité de limiter l'angle d'apparition du courant n'est pas traitée dans cette norme, mais sera discutée dans le Rapport Technique IEC 61869-100

2B.1.2 Facteur de dimensionnement pour le régime transitoire K_{td}

Le facteur de dimensionnement pour le régime transitoire K_{td} est le paramètre final du dimensionnement du circuit magnétique. Il est mentionné sur la plaque signalétique. Il peut être calculé d'après différentes fonctions du facteur transitoire K_{tf}, comme indiqué dans les équations ci-dessous et représenté à la Figure 2B.3.

Dans certains cas, le système de protection associé peut avoir besoin d'une valeur t'_{al} qui n'est pas constante et dépend de différents paramètres du courant de court-circuit. Aussi le constructeur du système de protection peut indiquer le facteur de dimensionnement pour le régime transitoire K_{td}, en raison d'essais de stabilité au système de protection.

Le facteur transitoire K_{tf} donné dans cette partie est déterminé à l'aide de l'équation différentielle du circuit équivalent, avec une inductance constante du circuit magnétique du transformateur de courant, avec une charge ohmique et sans tenir compte de la rémanence. Les solutions de l'équation différentielle sont données soit sous forme de diagrammes de courbes, soit comme formules simplifiées.

NOTE L'équation différentielle et la solution exacte sont données dans le Rapport Technique CEI 61869-100 TR.

K_{tf} et le flux embrassé par l'enroulement secondaire dépendent tous deux du temps et, au final, du temps limite de précision t'_{al} requis par le système de protection. Si l'on effectue un calcul avec l'inductance linéaire, la solution n'est valide que jusqu'à la première saturation du transformateur de courant.

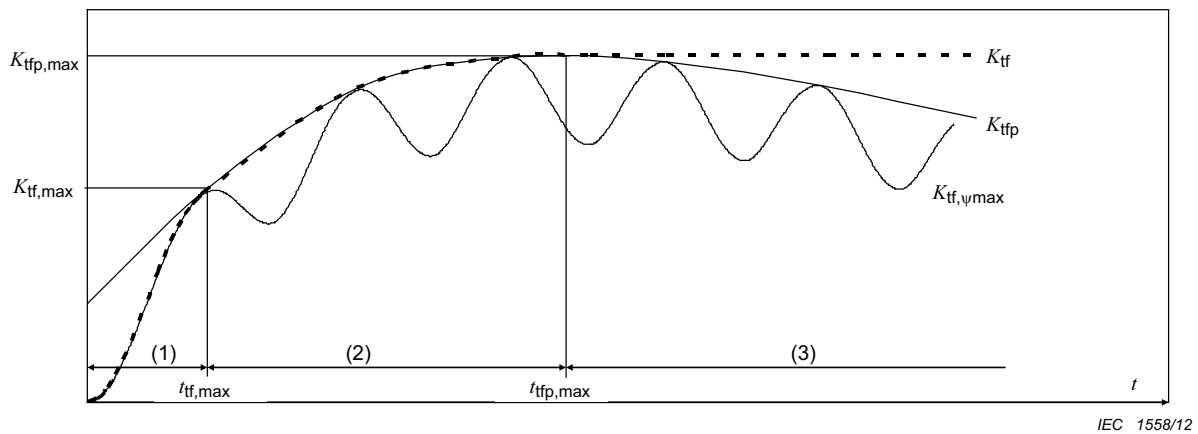


Figure 2B.3 – Plages de temps appropriées pour le calcul du facteur transitoire

Dans la Figure 2B.3, la courbe $K_{tf,\psi max}$ est construite comme suit:

Pour chaque point de temps de la courbe ψ_{max} (Figure 2B.2), la valeur K_{tf} est calculée selon 3.4.233. K_{tfp} est la courbe d'enveloppe correspondante. La courbe du facteur transitoire est constituée de trois plages définies par trois fonctions de K_{tf}:

Plage 1: $0 \leq t_{al} < t_{tf,max}$:

Dans la première plage, la courbe K_{tf} suit la courbe $K_{tf,\psi max}$. La plage commence au temps zéro et se termine lorsque la courbe $K_{tf,\psi max}$ touche sa courbe enveloppe de crête K_{tfp} au temps

$$t_{\text{tf,max}} = \frac{\pi + \varphi}{\omega} \tag{2B.5}$$

L'équation (2B,5) est la simplification d'une équation plus générale avec $\gamma = 90°$, mais elle est convenable pour l'application pratique.

Dans cette plage de temps, $K_{\text{tf},\psi\,\max}$ considère l'angle de commutation dans le cas le plus défavorable $\theta(t'_{\text{al}})$, ce qui conduit au flux le plus élevé au temps limite de précision t'_{al}. Les Figures numérotées Figure 2B.4 à Figure 2B.6 représentent les courbes pour différents temps t_{al} en fonction de la constante de temps du primaire T_{p}. Une constante de temps secondaire T_{S} a été choisie assez grande pour le calcul. Des valeurs inférieures de T_{S} donnent des valeurs K_{tf} légèrement inférieures.

NOTE Une plus grande diversité de courbes est donnée dans le Rapport Technique CEI 61869-100 TR.

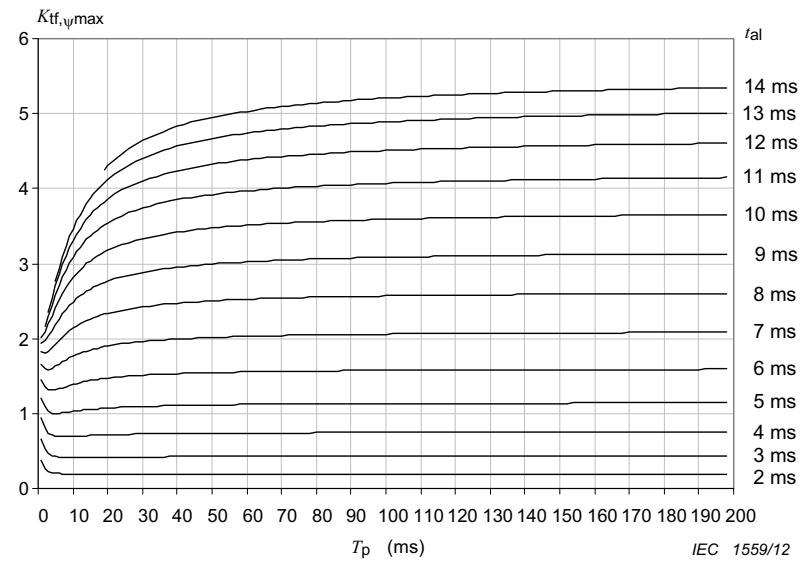


Figure 2B.4 – Détermination de K_{tf} pour la plage 1 à 50 Hz et T_{S} = 1,8 s

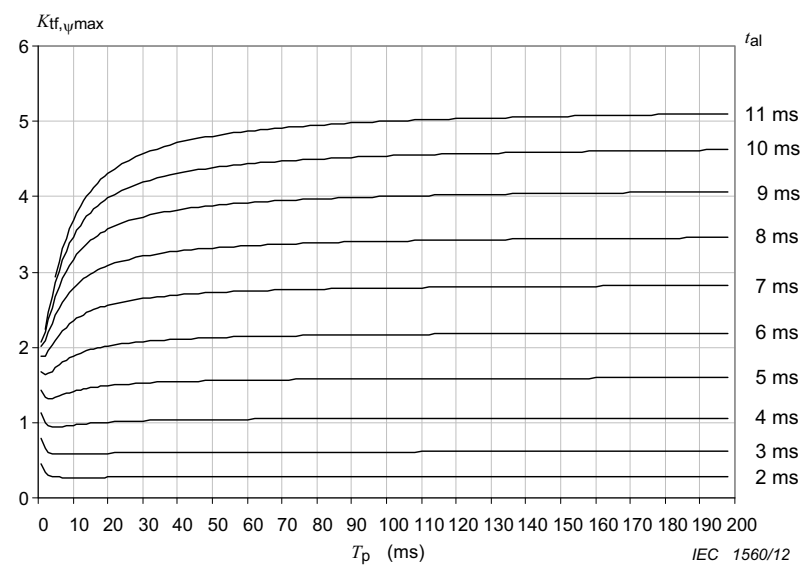


Figure 2B.5 – Détermination de K_{tf} pour la plage 1 à 60 Hz et T_{S} = 1,5 s

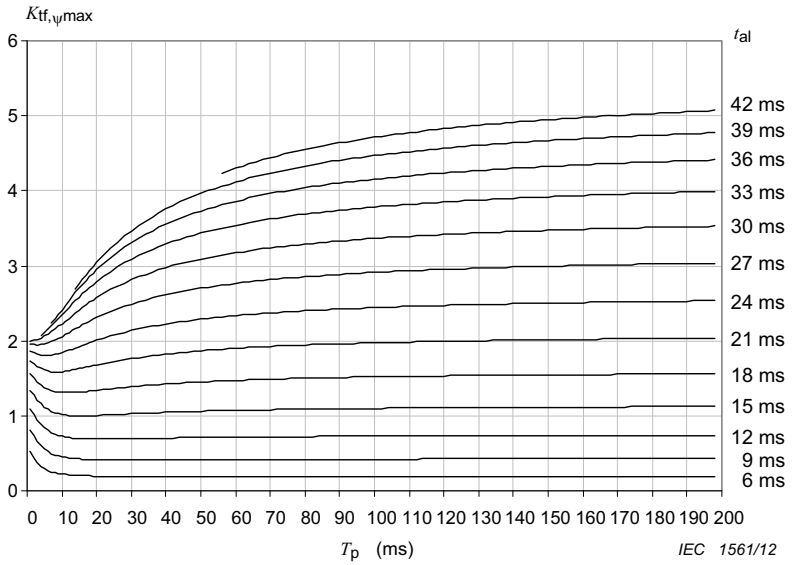


Figure 2B.6 – Détermination de K_{tf} pour la plage 1 à 16,7 Hz et T_s = 5,5 s

Plage 2: $t_{tf,max} \le t_{al} < t_{tfp,max}$

La deuxième plage de temps se poursuit avec la courbe enveloppe K_{tfp} pour $\gamma = 90°$ qui conduit au flux de crête le plus élevé, soit $\theta = 90° - \varphi$.

$$K_{tfp} = \frac{\omega T_s T_p}{T_p - T_s}\cos(\theta)\left(e^{-t_{al}/T_p} - e^{-t_{al}/T_S}\right) + \sin(\theta)e^{-t_{al}/T_S} + 1 \qquad (2B.6)$$

jusqu'au maximum de la courbe au temps:

$$t_{tfp,max} = \frac{T_p T_s}{T_p - T_s}\ln\frac{\frac{T_p}{T_s}\cos(\theta) + \frac{T_s - T_p}{\omega T_s^2}\sin(\theta)}{\cos(\theta)} \qquad (2B.7)$$

Plage 3: $t_{tfp,max} \le t_{al}$

La troisième plage de temps se poursuit avec le maximum constant $K_{tfp,max}$, donné à l'équation (2B.8) pour les temps limites de précision plus grands. $K_{tfp,max}$ est défini comme maximum de la courbe K_{tfp} .

$$K_{tfp,max} = \left(\omega T_p \cos(\theta) + \frac{T_p + T_s}{T_s}\sin(\theta)\right) \times \left[\frac{\frac{T_p}{T_s}\cos(\theta) + \frac{T_s - T_p}{\omega T_s^2}\sin(\theta)}{\cos(\theta)}\right]^{\frac{T_p}{T_s - T_p}} + 1 \qquad (2B.8)$$

2B.1.3 Cycles de fonctionnement C-O-C-O

Le dimensionnement pour le régime transitoire destiné aux cycles de fonctionnement à réarmement automatique doit être effectué séparément pour chaque cycle, selon les équations données ci-dessus.

Pour les noyaux ayant une constante de temps assignée de la boucle secondaire élevée (typiquement classe TPX), il n'y a presque pas de diminution du flux après t':

$$K_{\text{td,(C–O–C–O)}} = K_{\text{td}}(t') + K_{\text{td}}(t''_{\text{al}}) \tag{2B.9}$$

Pour les circuits ayant une petite constante de temps assignée de la boucle secondaire (typiquement classes TPY et TPZ), le flux diminue de manière exponentielle avec la constante de temps du secondaire T_{S} pendant le temps de répétition de défaut t_{fr}. Dans ce cas, il n'existe pas de formule analytique pour le temps t pendant le premier défaut, et il faut considérer de différentes situations:

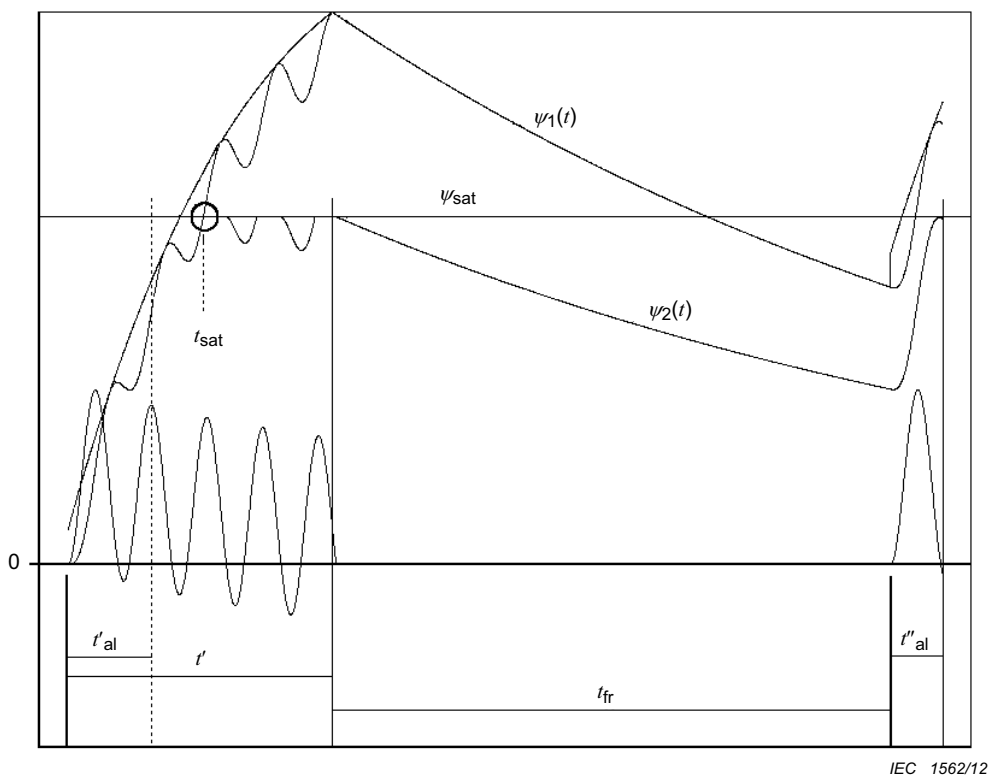


Figure 2B.7 – Limitation du flux magnétique considérant la saturation du noyau

Figure 2B.7 représente une situation typique où la saturation est atteinte après t'_{al}. Le flux (ψ_2(t)) est limité au niveau de saturation (ψ_{sat}) avant que t' ne soit atteint. Pendant t_{fr}, le flux décroit à une valeur qui est assez faible pour rester en-dessous de la saturation jusqu'à t''_{al}. Si la saturation est ignorée, (voir courbe ψ_1(t)), le flux recommence à augmenter à partir d'un niveau supérieur au début du second défaut. Cet exemple montre l'interdépendance de dimensionnement des noyaux entre le premier et le second défaut, et la détermination de K_{td}.

NOTE 1 La formule pour les cycles de fonctionnement C-O-C-O qui était donnée dans l'ancienne norme IEC 60044-6 ignore le phénomène de saturation pendant le temps du premier défaut. En conséquence, une valeur K_{td}, trop élevée est obtenue dans beaucoup de situations.

Pour cette raison, il convient de tracer un graphe par analogie avec Figure 2B.7, afin de se rendre compte de la situation réelle. L'équation suivante donne une limite supérieure pour K_{td}:

$$K_{\text{td,(C–O–C–O)max}} = \max \left\{ K_{\text{td}}(t'_{\text{al}}),\ K_{td}(t') e^{-(t_{tr}+t''_{\text{al}})/T_{\text{s}}} + K_{\text{td}}(t''_{\text{al}}) \right\} \quad \text{(2B.10)}$$

NOTE 2 Dans le Rapport Technique CEI 61869-100 TR, des méthodes de calcul sont données pour la détermination de K_{td},

2B.2 Détermination de la caractéristique de magnétisation du circuit magnétique

2B.2.1 Généralités

La mesure de la caractéristique de magnétisation du circuit magnétique implique

- La mesure de l'inductance de magnétisation L_{m};
- La mesure du Facteur de rémanence K_{R};
- La détermination de l'erreur aux conditions limites, utilisant une méthode indirecte.

Toutes ces déterminations sont fondées sur l'équation suivante. Si une tension arbitraire $u(t)$ est appliquée aux bornes secondaires (voir Figure 2B.8), le flux du circuit magnétique $\psi(t)$ embrassé par l'enroulement secondaire au temps t est fonction de cette tension, selon l'équation:

$$\psi(t) = \int_0^t (u(t) - R_{\text{ct}} \times i_{\text{m}}(t))dt \quad \text{(2B.11)}$$

où i_{m} est la valeur instantanée du courant de magnétisation.

NOTE Comme le terme «courant d'excitation» est réservé pour la valeur efficace d'un courant alternatif (voir 3.3.207), i_{m} et le terme «courant de magnétisation» sont utilisés pour les valeurs instantanées des méthodes en courant continu et de décharge d'un condensateur.

Les méthodes décrites dans les articles suivants sont basées sur cette relation.

L'influence de la chute de tension dans la résistance de l'enroulement secondaire doit être estimée. Si elle dépasse 2 %, cette chute doit être déduite de la tension mesurée.

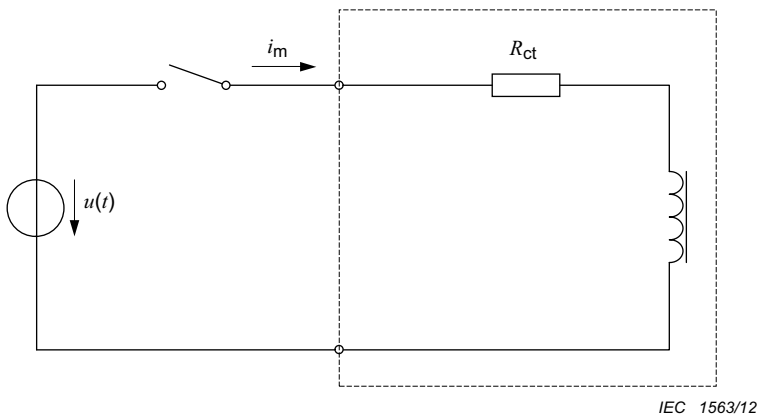


Figure 2B.8 – Circuit de base

Pour les transformateurs de courant de classe TPX, il est nécessaire de démagnétiser le circuit magnétique avant chaque essai en raison de la valeur élevée du facteur de rémanence. Pour les transformateurs de courant de classe TPY, le flux rémanent est souvent si faible qu'il peut être négligé. La démagnétisation exige des moyens supplémentaires grâce auxquels on peut imposer au circuit magnétique, à partir de l'état de saturation, des cycles

d'hystérésis dont l'amplitude décroît lentement. Une source de courant continu est normalement prévue lorsque la méthode d'essai en courant continu doit être utilisée.

On peut appliquer la méthode en courant alternatif, la méthode en courant continu ou la méthode par décharge d'un condensateur.

2B.2.2 Méthode en courant alternatif

2B.2.2.1 Détermination de l'inductance de magnétisation L_m

Une tension alternative pratiquement sinusoïdale $u(t)$ est appliquée aux bornes secondaires, et la valeur correspondante du courant d'excitation est mesurée. L'essai peut être effectué à une fréquence réduite f' pour éviter une contrainte de tension inacceptable sur l'enroulement et sur les bornes secondaires. Aux fréquences basses, les effets des pertes parasites par courants de Foucault dans le circuit magnétique et des courants capacitifs entre les couches de l'enroulement sont moins susceptibles de perturber les mesures. Le résultat doit être visualisé comme courbe de saturation.

La tension d'excitation doit être mesurée avec un appareil qui donne une réponse proportionnelle à la valeur moyenne du signal redressé, mais est gradué en valeur efficace. Le courant d'excitation doit être mesuré à l'aide d'un appareil de mesure de valeur crête.

On obtient la valeur crête du flux embrassé par l'enroulement secondaire ψ selon

$$\hat{\psi} = \frac{\sqrt{2}\,U}{2\pi f'}$$

où U est la valeur efficace mesurée de la tension appliquée à la fréquence f'.

En conséquence, la tension de saturation U_{sat} correspond avec le flux de saturation ψ_{sat} selon

$$\hat{\psi}_{sat} = \frac{\sqrt{2}\,U_{sat}}{2\pi f'}$$

NOTE 201 U_{sat} doit être estimée égale à la tension où la courbe est pratiquement horizontale. L'influence de l'incertitude dans la détermination de U_{sat} est pratiquement négligeable pour la détermination de L_m.

Considérant cette équation, la courbe donne la relation entre la valeur crête du courant d'excitation et la valeur crête du flux ψ embrassé par l'enroulement secondaire. L'inductance de magnétisation L_m est définie par la pente moyenne de la courbe entre 20 % et 70 % du flux de saturation ψ_{sat}. Elle est calculée suivant:

$$L_m = \frac{0{,}5 \times U_{sat} \times \sqrt{2}}{(\hat{i}_{70} - \hat{i}_{20}) \times 2\pi f'}$$

où $\hat{i}_{20}$ est la valeur crête du courant d'excitation à 20 % U_{sat};

$\hat{i}_{70}$ est la valeur crête du courant d'excitation à 70 % U_{sat}.

NOTE 202 Cette formule diffère légèrement de la formule donnée dans l'ancienne norme IEC 60044-6 à cause de la définition améliorée de la saturation.

2B.2.2.2 Détermination de l'erreur aux conditions limites

L'arrangement d'essai selon 2B.2.2.1 doit être utilisé.

La tension doit être augmentée jusqu'à une tension égale à E_{al} selon

$$E_{al} = K_{ssc} \times K_{td} \times (R_{ct} + R_b) \times I_{sr}$$

La valeur de crête du courant secondaire d'excitation ($\hat{I}_{al}$) ne doit pas dépasser la valeur donnée ci-dessous:

Pour les classes TPX et TPY: $\hat{I}_{al} \leq \sqrt{2} \times I_{sr} \times K_{ssc} \times \hat{\varepsilon}$

Pour la classe TPZ: $$\hat{I}_{al} \leq \sqrt{2} \times I_{sr} \times K_{ssc} \times \left(\frac{K_{td} - 1}{2\pi f_R \times T_S} + \hat{\varepsilon}_{ac} \right)$$

NOTE Pour les transformateurs de courant de classe TPZ, la précision n'est spécifiée que pour la composante alternative; toutefois, lors de la détermination de la valeur admissible de I_{al} pendant les essais indirects, il est également nécessaire de tenir compte de la composante continue du courant d'excitation. Dans l'équation ci-dessus, la composante continue est représentée par $(K_{td} - 1)$.

2B.2.2.3 Détermination du facteur de rémanence K_R

A la différence de ce qui est décrit dans 2B.2.2.1 et 2B.2.2.2, les formes d'onde doivent être enregistrées.

Lorsque l'on détermine le facteur de rémanence K_R par la méthode d'essai en courant alternatif, il est nécessaire d'intégrer la tension d'excitation selon l'équation (1) donnée en 2B.2.1. La tension intégrée associée au courant correspondant i_m affiche une courbe d'hystérésis, représentant le flux de saturation ψ_{sat}. On considère que la valeur du flux au passage par zéro du courant représente le flux rémanent ψ_r. Voir la Figure 2B.9. Le facteur de rémanence K_R est alors calculé comme suit:

$$K_R = \frac{\psi_r}{\psi_{sat}} \qquad (2B.12)$$

Aux fréquences basses, les effets des pertes parasites par courants de Foucault dans le circuit magnétique et des courants capacitifs entre les couches de l'enroulement sont moins susceptibles de perturber les mesures.

NOTE ψ_{sat} doit être estimé comme flux embrassé par l'enroulement secondaire au niveau où la courbe est pratiquement horizontale.

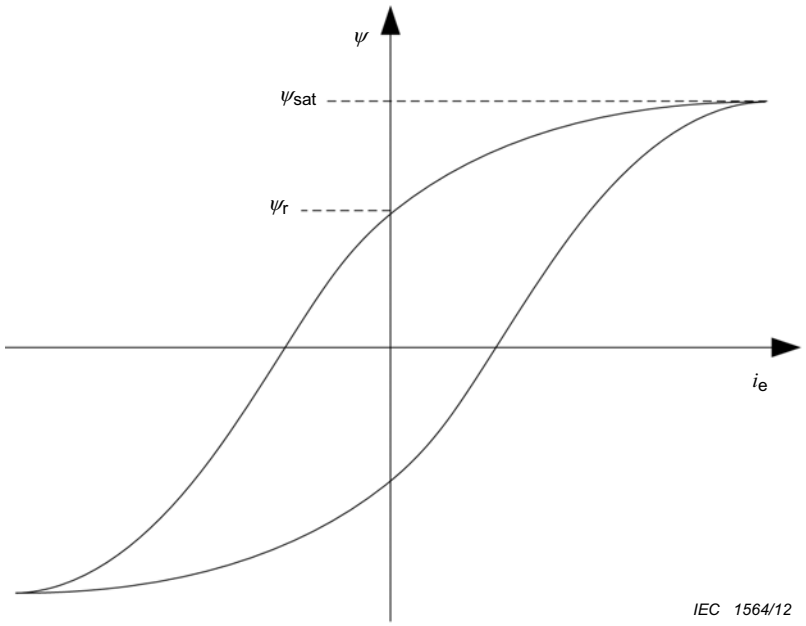


Figure 2B.9 – Détermination du facteur de rémanence par cycle d'hystérésis

2B.2.3 Méthode en courant continu

2B.2.3.1 Généralités

La méthode de la saturation en courant continu consiste à appliquer une tension continue u(t) pendant une durée telle que la valeur de flux de saturation soit atteinte. La mesure du flux est déterminée selon l'équation (2B.11) donnée en 2B.2.1, où u(t) est la tension entre les bornes. Voir la Figure 2B.10.

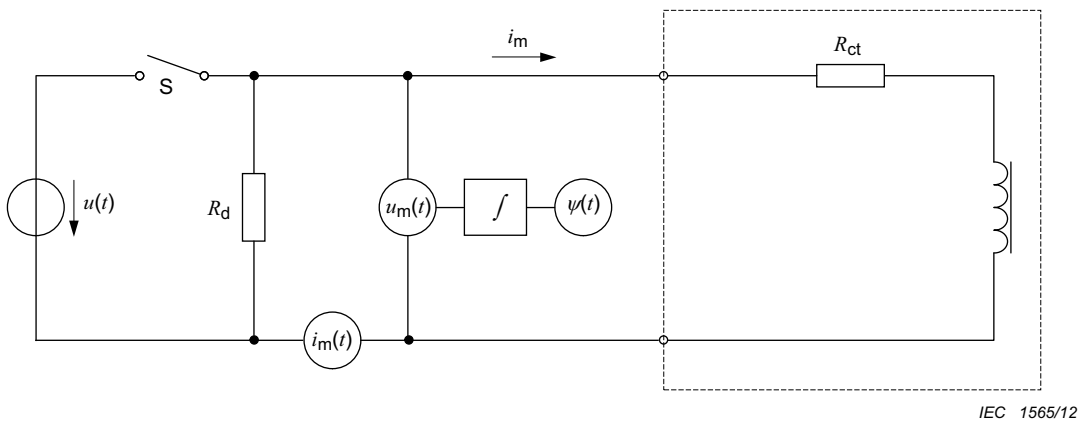


Figure 2B.10 – Circuit pour la méthode en courant continu

La source de tension appliquée doit être appropriée pour amener le transformateur de courant à la saturation.

La résistance de décharge R_d doit être connectée, sinon l'inductance du circuit magnétique peut provoquer des surtensions très élevées à l'ouverture de l'interrupteur S, lorsque le courant inductif est interrompu.

2B.2.3.2 Détermination du facteur de rémanence K_R

Le circuit d'essai selon 2B.2.3.1 doit être utilisé.

Quelque temps après la fermeture de l'interrupteur S, le courant d'excitation est considéré comme ayant atteint sa valeur maximale $\hat{\imath}_m$ pour laquelle le flux dans le circuit magnétique demeure constant. Avant d'atteindre la valeur constante, la courbe i_m doit montrer une augmentation significative de sa pente, indiquant la saturation. La source de tension appliquée doit être appropriée pour amener le transformateur de courant à la saturation sans influencer les résultats d'essai à cause de ses limites. Cette condition est accomplie si le flux embrassé par l'enroulement secondaire atteint une valeur stabilisée avant le courant de magnétisation.

Les valeurs croissantes du courant de magnétisation et du flux doivent être enregistrées jusqu'au moment où ces valeurs deviennent constantes, puis l'interrupteur S est ouvert.

Des enregistrements d'essai typiques du flux $\psi(t)$ et du courant de magnétisation $i_e(t)$ sont représentés à la Figure 2B.11.

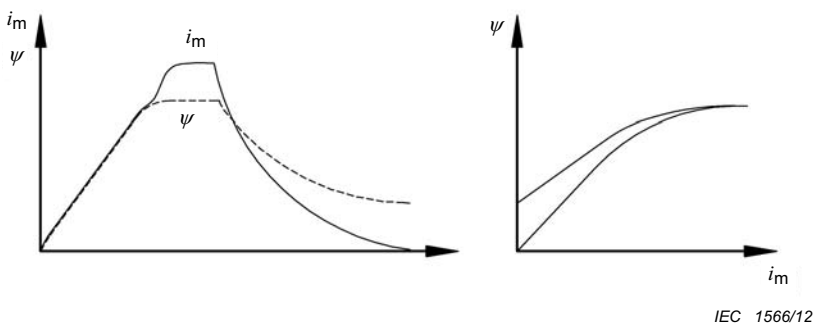


Figure 2B.11 – Diagrammes temps-amplitude et flux-courrant

A l'ouverture de l'interrupteur S, un courant de décroissant traverse l'enroulement secondaire et la résistance de décharge R_d. La valeur du flux correspondant décroît, mais peut ne pas devenir nulle lorsque le courant s'annule. Si l'on a convenablement choisi un courant de magnétisation i_m pour parvenir au flux de saturation ψ_{sat}, une fois que le courant s'est annulé, la valeur de flux subsistant doit être considérée comme étant égale au flux rémanent ψ_r.

Pour les transformateurs de courant dont le circuit magnétique n'a pas été démagnétisé au préalable, le facteur de rémanence (K_R) peut être déterminé par le biais d'un essai complémentaire pour lequel les bornes secondaires ont été permutées. La courbe du flux embrassé par l'enroulement secondaire contient un déplacement de la moitié du flux de rémanence mesuré apparemment. Pour cette raison, la ligne de zéro doit être déplacée conformément, et les valeurs du flux de saturation et du flux de rémanence doivent être adaptées. Voir Figure 2B.12.

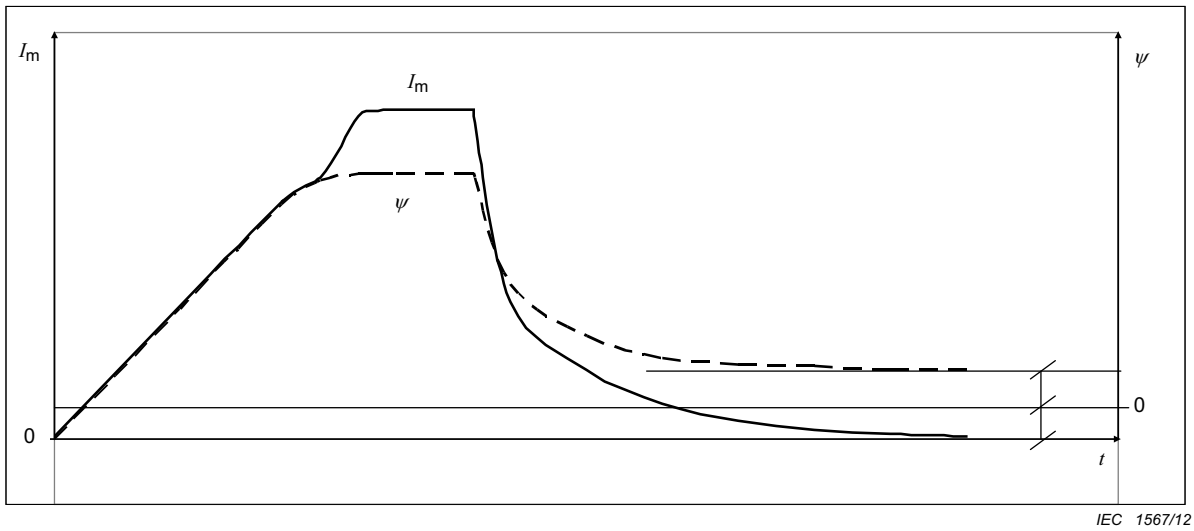


Figure 2B.12 – Diagramme avec la ligne de zéro déplacée

Le facteur de rémanence K_R est calculé selon

$$K_R = \frac{\psi_r}{\psi_{sat}} \tag{2B.13}$$

2B.2.3.3 Détermination de l'inductance de magnétisation

Le circuit d'essai selon 2B.2.3.2 doit être utilisé.

L'inductance de magnétisation (L_m) peut être déduite selon l'équation suivante:

$$L_m = \frac{0{,}5 \times \psi_{sat}}{i_{70} - i_{20}} \tag{2B.14}$$

où

i_{20} est la valeur de crête du courant de magnétisation à 20% ψ_{sat};

i_{70} est la valeur de crête du courant de magnétisation à 70% ψ_{sat}.

NOTE Cette formule diffère légèrement de la formule donnée dans l'ancienne norme IEC 60044-6 à cause de la définition améliorée de la saturation.

2B.2.3.4 Détermination de l'erreur aux conditions limites

Le circuit d'essai selon 2B.2.3.1 doit être utilisé.

Pour la détermination de l'erreur aux conditions limites, le courant magnétisant i_m correspondant au flux ψ_{al} embrassé par le secondaire doit être mesuré pendant l'accroissement du flux.

ψ_{al} est le flux embrassé au secondaire correspondant à E_{al} et est donné comme

$$\psi_{al} = \frac{\sqrt{2} \times E_{al}}{2\pi f_R} = \frac{\sqrt{2} \times K_{td} \times K_{ssc} \times I_{sr} \times (R_b + R_{ct})}{2\pi f_R}$$

Le courant de magnétisation i_m ne doit pas dépasser les limites suivantes:

Pour classes TPX and TPY: $i_m \leq \sqrt{2} \times I_{sr} \times K_{ssc} \times \hat{\varepsilon}$

Pour classe TPZ: $i_m \leq \sqrt{2} \times I_{sr} \times K_{ssc} \times \left(\frac{K_{td} - 1}{2\pi f_R \times T_S} + \hat{\varepsilon}_{ac} \right)$

NOTE Pour les transformateurs de courant de classe TPZ, la précision n'est spécifiée que pour la composante alternative; toutefois, lors de la détermination de la valeur admissible de I_{al} pendant les essais indirects, il est également nécessaire de tenir compte de la composante continue du courant d'excitation. Dans l'équation ci-dessus, la composante continue est représentée par $(K_{td} - 1)$.

2B.2.4 Méthode par décharge d'un condensateur

La méthode par décharge d'un condensateur utilise la charge d'un condensateur pour exciter le circuit magnétique du transformateur de courant depuis le secondaire. La mesure du flux est obtenue à partir de l'équation 1 donnée en 2B.2.1 où u(t) est la tension sur les bornes. Voir Figure 2B.13.

Le condensateur est chargé avec une tension suffisamment élevée pour produire un flux de saturation embrassé par l'enroulement secondaire ψ_{al} correspondant à E_{al}. Voir les Figures 2B.13 et 2B.14.

$$\psi_{al} = \frac{\sqrt{2} \times E_{al}}{2\pi f_R}$$

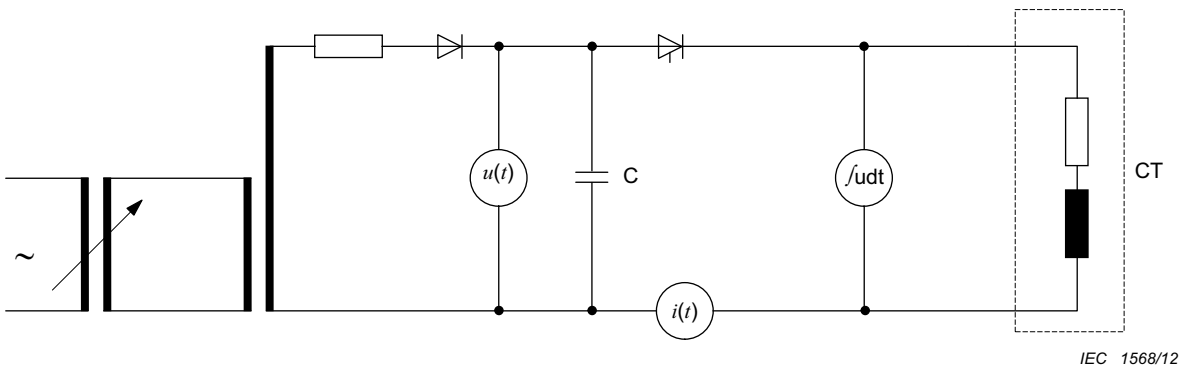


Figure 2B.13 – Circuit utilisé dans la méthode par décharge d'un condensateur

Au moment où ψ_{al} est atteint, la valeur de crête du courant de magnétisation secondaire i_m doit être mesurée, et ne doit pas dépasser la valeur de crête du courant d'excitation secondaire $\hat{I}_{al}$.

La constante de temps assignée de la boucle secondaire T_s doit être déterminée en appliquant aux bornes secondaires du transformateur de courant, une tension afin que l'intégrale tension-temps atteigne une valeur égale à celle qui correspond à 90% de ψ_{al}. Le courant de magnétisation i'_m est mesuré et la constante de temps est calculée comme suit:

$$T_s = \frac{\sqrt{2} \times 0{,}9 \times E_{al}}{2\pi f_R \times (R_{ct} + R_b) \times i'_m}$$

NOTE Cette définition n'est pas conforme aux définitions précédentes des méthodes en courant continu et en courant alternatif.

En déterminant le facteur de rémanence K_R, la tension intégrée détermine un cycle d'hystérésis avec le courant correspondant. Si le courant de magnétisation est tel que saturation est atteinte, la valeur de flux correspondant au passage par zéro du courant est considérée comme ψ_r.

Le facteur de rémanence est déterminé:

$$K_R = \frac{\psi_r}{\psi_{sat}}$$

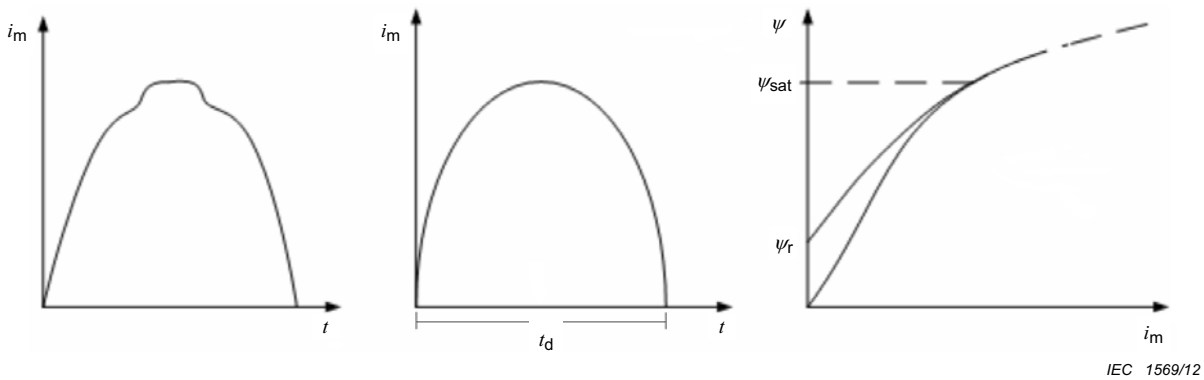


Figure 2B.14 – Enregistrements types de la méthode par décharge d'un condensateur

2B.3 Détermination de l'erreur aux conditions limites des transformateurs de courant pour protection pour réponse en régime transitoire

2B.3.1 Généralités

Le courant d'erreur instantané peut être mesuré de différentes manières. Dans tous les cas, les erreurs du système de mesure ne doivent pas dépasser 10 % de la limite d'erreur correspondant à la classe du transformateur de courant soumis à l'essai pendant la totalité du cycle de fonctionnement.

2B.3.2 Essai direct

Il est nécessaire de démagnétiser les transformateurs de courant de classe TPX avant l'essai direct en raison de la valeur élevée du facteur de rémanence. Il peut être nécessaire de démagnétiser les transformateurs de courant de classe TPY si le facteur de rémanence K_R n'est pas négligeable.

Deux essais directs doivent être effectués à la fréquence assignée, avec la charge secondaire assignée:

a) Le courant primaire de court-circuit assigné, à la fréquence assignée, est appliqué sans décalage. On mesure la composante alternative de l'erreur instantanée. Elle doit être conforme à la valeur théorique de $1/\omega T_s$.

b) Pour vérifier les exigences d'erreur du cycle de fonctionnement, l'essai suivant sera réalisé:
Le courant primaire de court-circuit assigné, à la fréquence assignée, est appliqué avec le décalage requis. Pour les valeurs spécifiées de la constante de temps du primaire allant jusqu'à 80 ms, l'essai est effectué à la condition limite de précision spécifiée (cycle de

fonctionnement spécifié). La constante de temps du primaire ne doit pas différer de plus de 10 % de la valeur spécifiée.

Pour les valeurs spécifiées de la constante de temps du primaire supérieures à 80 ms, les essais peuvent être effectués à des conditions limites de précision équivalentes (en modifiant le cycle de fonctionnement et/ou la charge), sous réserve d'accord entre le constructeur et l'acheteur.

Pendant la période d'excitation, la première crête du courant primaire ne doit pas être inférieure à la valeur correspondant aux conditions spécifiées.

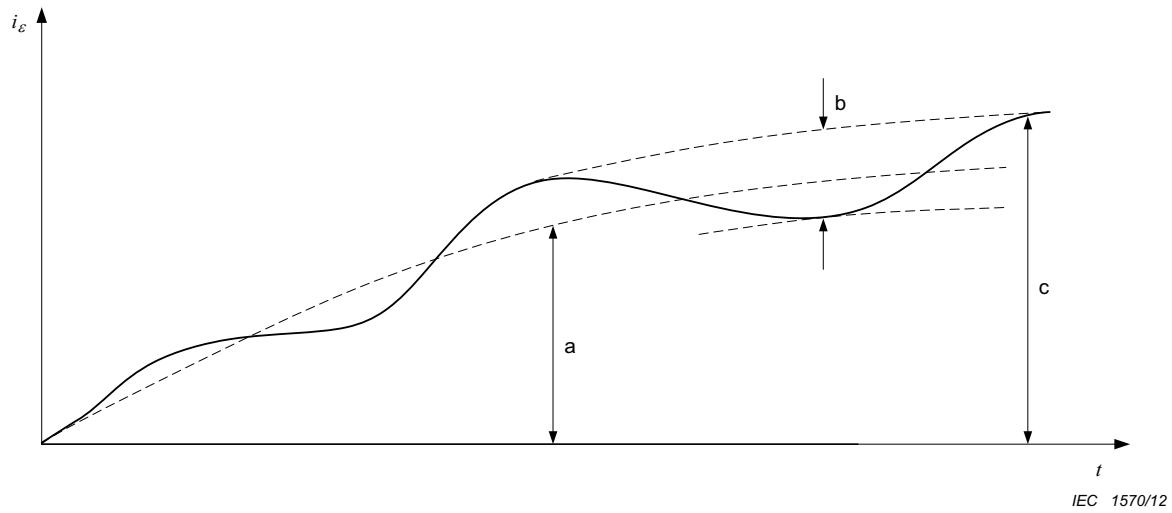
En pratique, au laboratoire il peut être difficile de reproduire le cycle de fonctionnement exact. Dans ce cas, la valeur calculée de K_{td} du cycle de fonctionnement appliqué ne doit pas être inférieure à la valeur K_{td} du cycle de fonctionnement spécifié. Pour répondre à cette exigence il est permis d'ajuster la durée du cycle et/ou la charge secondaire.

NOTE Puisque le calcul de K_{td} se rapporte aux formules aux conditions les plus défavorables (la formule 6 dans 2B.1.2 peut délivrer des valeurs K_{td} qui son 30 % plus élevées que nécessaire), le transformateur de courant peut répondre aux exigences du cycle de fonctionnement sans atteindre le flux correspondant à la valeur calculée de K_{td}.

Pour les transformateurs de courant de classes TPX et TPY, le courant d'erreur instantané i_ε est mesuré: $i_\varepsilon = i_s \times k_r - i_p$. La valeur de l'erreur $\hat{\varepsilon}$ doit être déterminée selon le paragraphe 3.4.222. Sa valeur ne doit pas dépasser la limite indiquée dans le Tableau 206.

Pour les transformateurs de courant de la classe TPZ, on mesure la composante alternative du courant d'erreur en prenant la moitié de la valeur crête à crête (voir Figure 2B.15). La valeur de l'erreur $\hat{\varepsilon}_{ac}$ doit être déterminée selon le paragraphe 3.4.223. Sa valeur ne doit pas dépasser la limite indiquée dans le Tableau 206.

NOTE Il est possible que la définition de classe ne contienne pas de cycle de fonctionnement. Dans ce cas, pour les essais, un cycle de fonctionnement conduisant à la valeur K_{td} donnée doit faire l'objet d'un accord entre le constructeur et l'acheteur.



où:

a= $\hat{i}_{\varepsilon dc}$

b= $2\hat{i}_{\varepsilon ac}$

c= $\hat{i}_{\varepsilon ac} + \hat{i}_{\varepsilon dc}$

pour TPY: $\hat{i}_\varepsilon = c$

pour TPZ: $\hat{i}_\varepsilon = \hat{i}_{\varepsilon ac} = \dfrac{b}{2}$

Figure 2B.15 – Mesure des courants d'erreur

Si la valeur réelle de K_{td} doit être déterminée, la durée de l'excitation et/ou la charge secondaire doit être augmentée, afin que le courant d'erreur instantané mesuré atteigne la limite de la classe concernée (Tableau 206). Pour la classe TPZ, l'interpolation linéaire est utilisée pour déterminer l'instant où la composante alternative atteint la limite.

Le flux embrassé par l'enroulement secondaire ψ_{dir} doit être déterminé comme suit:

$$\psi(t) = \frac{R_{\text{ct}} + R_{\text{b}}}{R_{\text{b}}} \times \int_0^t R_{\text{b}} \times i_{\text{s}}(t)dt$$

où

t est l'instant où la limite d'erreur $\hat{\varepsilon}$ ou $\hat{\varepsilon}_{ac}$ est atteinte.

Le facteur de dimensionnement K_{td} du transformateur de courant est le rapport ψ_{dir} à la valeur crête de la composante alternative de ψ en régime permanent. La composante alternative peut être obtenue à partir des mesures du flux embrassé par l'enroulement secondaire dans l'essai a), qui doit être mise en relation avec la valeur exacte (théorétique) du courant de court-circuit K_{ssc} x I_{sr}. La mesure doit être réalisée avec la formule ci-dessus.

L'erreur de mesure du flux ne doit pas dépasser 5 %.

2B.3.3 Détermination du facteur de construction

Si la conformité avec les exigences d'une conception à faible réactance de fuite ne peut pas être établie à la satisfaction mutuelle du constructeur et de l'acheteur par le biais des dessins, le facteur de construction F_c doit être déterminé comme suit:

Les valeurs de flux embrassé par l'enroulement secondaire doivent être déterminées en essais direct et indirect, à la condition de la limite de précision dans les deux cas. Si une classe pour réponse en régime transitoire est spécifiée avec la définition alternative, un cycle de fonctionnement et une charge doivent être choisis afin d'atteindre la valeur spécifiée de $K_{ssc} \times K_{td}$.

Le flux embrassé par l'enroulement secondaire ψ_{dir}, qui est obtenu dans l'essai direct selon 2B.3.2 doit être déterminé.

Dans l'essai indirect, le flux embrassé par l'enroulement secondaire $\hat{\psi}_{ind}$ doit être déterminé avec une des méthodes suivantes:

méthode en courant alternatif:

L'arrangement d'essai selon 2B.2.2.1 doit être utilisé.

La tension doit être augmentée jusqu'à ce que la limite correspondante du courant d'excitation $\hat{I}_{al}$ (selon 2B.2.2.2) soit atteinte. La tension obtenue soit notée. Le flux embrassé par l'enroulement secondaire $\hat{\psi}_{ind}$ est donné par:

$$\hat{\psi}_{ind} = \frac{\sqrt{2} \times U}{2\pi f}$$

où f est la fréquence appliquée.

méthode en courant continu ou par décharge d'un condensateur

Le circuit d'essai selon 2B.2.3.1 (méthode en courant continu) ou 2B.2.4 (méthode par décharge d'un condensateur) doit être utilisé.

Le flux $\hat{\psi}_{ind}$ est le flux embrassé par l'enroulement secondaire qui correspond à la limite du courant de magnétisation selon 2B.2.3.4

F_c peut alors être calculé par $$F_c = \frac{\hat{\psi}_{ind}}{\hat{\psi}_{dir}}$$

L'erreur de mesure du flux ne doit pas dépasser 5 %.

Si F_c est supérieur à 1,1, le facteur doit être considéré lors du dimensionnement du noyau.

NOTE La valeur du courant primaire nécessaire pour effectuer des essais directs d'erreur composée sur certains types de transformateurs peut dépasser la capacité des installations normalement fournies par les constructeurs. Des essais à des niveaux de courant primaire inférieurs peuvent faire l'objet d'un accord entre le constructeur et l'acheteur.

Annexe 2C
(normative)

Preuve de type à faible réactance de fuite

On doit montrer que:

- le transformateur de courant possède un circuit magnétique présentant pratiquement la forme d'un tore, avec, le cas échéant, des entrefers uniformément répartis:
- le transformateur de courant possède un enroulement secondaire uniformément réparti;
- le transformateur de courant possède un conducteur primaire symétrique par rapport à la rotation;
- L'influence des conducteurs de la phase adjacente, à l'extérieur de l'enveloppe du transformateur de courant, et des phases voisines est négligeable.

Si la conformité avec les exigences d'une conception à faible réactance de fuite ne peut pas être établie à la satisfaction mutuelle du constructeur et de l'acheteur par le biais des dessins, les résultats d'un essai direct et d'un essai indirect doivent être comparés comme suit:

Pour les transformateurs de courant des classes TPX, TPY et TPZ le facteur de construction F_c doit être déterminé selon 2B.3.3. Si F_c est inférieure à 1,1, le transformateur de courant est considéré comme type à faible réactance de fuite.

Pour toutes les autres classes de protection, l'erreur composée de l'enroulement compète doit être déterminé par un essai direct et un essai indirect, et les deux résultats sont comparés.

Pour l'essai direct, l'un ou l'autre méthode selon 2A.5 ou 2A.6 peuvent être appliquées. Le courant d'essai est donné comme suit:

ALF x I_{pr} pour classe P et classe PR;

K_x x I_{pr} pour classe PX et classe PXR.

Pour l'essai indirect, la méthode selon 7.2.6.203 b) doit être appliquée. La tension appliquée aux bornes secondaires est donnée comme suit:

E_{ALF} pour classe P et classe PR;

E_k pour classe PX et classe PXR.

Si l'erreur composée de l'essai direct est inférieure à 1,1 fois l'erreur composée de l'essai indirect, le transformateur de courant est considéré comme type à faible réactance de fuite.

NOTE Selon la définition (3.4.235), le terme "type à faible réactance de fuite" n'est pas universelle, mais apparentée à sa perfomance (classe de protection).

Annexe 2D
(informative)

Technique utilisée dans l'essai d'échauffement des transformateurs immergés dans l'huile pour déterminer la constante thermique par estimation expérimentale

Liste des symboles:

θ	Température en °C
$\theta(t)$	Température de l'huile, variant dans le temps (il peut s'agir de la température de l'huile en tête ou de la température moyenne de l'huile)
θ_a	Température du milieu de refroidissement extérieur (air ambiant ou eau), supposée constante
$\Delta\theta$	Echauffement de l'huile au-dessus de θ_a
θ_u, $\Delta\theta_u$	Valeurs finales en régime établi
$\varepsilon(t)$	Ecart restant par rapport à la valeur en régime établi θ_u
T_o	Constante de temps pour la variation exponentielle de l'échauffement de l'huile
h	Intervalle de temps entre les relevés
θ_1, θ_2, θ_3	Trois relevés de température successifs séparés d'un intervalle de temps h

En principe, il convient de poursuivre l'essai jusqu'à s'assurer de l'échauffement (de l'huile) en régime établi.

$$\theta_u = \theta_a + \Delta\theta_u \tag{2D.1}$$

$$\theta(t) = \theta_a + \Delta\theta_u (1 - e^{-t/To}) \tag{2D.2}$$

L'écart restant par rapport au régime établi est alors:

$$\varepsilon(t) = \theta_u - \theta(t) = \Delta\theta_u \times e^{-t/To} \tag{2D.3}$$

On considère que:

– la température ambiante est maintenue aussi constante que possible;
– la température de l'huile $\theta(t)$ s'approche d'une valeur finale θu selon une fonction exponentielle avec une constante de temps T_o;
– l'équation (2D.2) est une bonne approximation de la courbe de température (voir Figure 2C.1).

Etant donnés trois relevés successifs $\Delta\theta_1$, $\Delta\theta_2$ et $\Delta\theta_3$, si la relation exponentielle de l'équation (2D.2) est une bonne approximation de la courbe de température, alors les incréments présentent la relation suivante:

$$\frac{\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1}{\Delta\theta_3 - \Delta\theta_2} = e^{h/T_o}$$

$$T_o = \frac{h}{\ln \frac{\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1}{\Delta\theta_3 - \Delta\theta_2}} \tag{2D.4}$$

Les relevés permettent également une prévision de l'échauffement final:

$$\Delta\theta_u = \frac{(\Delta\theta_2)^2 - \Delta\theta_1\Delta\theta_3}{2\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1 - \Delta\theta_3} \tag{2D.5}$$

Des estimations successives doivent être effectuées. Il convient que celles-ci convergent. Afin d'éviter des erreurs numériques aléatoires importantes, il convient que l'intervalle de temps h soit approximativement de T_o et il convient que $\Delta\theta_3/\Delta\theta_u$ soit supérieur ou égal à 0,95.

Une valeur plus précise de l'échauffement en régime établi est obtenue par une méthode d'extrapolation des moindres carrés de tous les points mesurés approximativement au-dessus de 60 % de $\Delta\theta_u$ ($\Delta\theta_u$ estimé par la méthode des trois points).

Une formulation numérique différente est:

$$\Delta\theta_u = \Delta\theta_2 + \frac{\sqrt{(\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1)-(\Delta\theta_3 - \Delta\theta_2)}}{\ln\dfrac{\Delta\theta_2 - \Delta\theta_1}{\Delta\theta_3 - \Delta\theta_2}} \tag{2D.6}$$

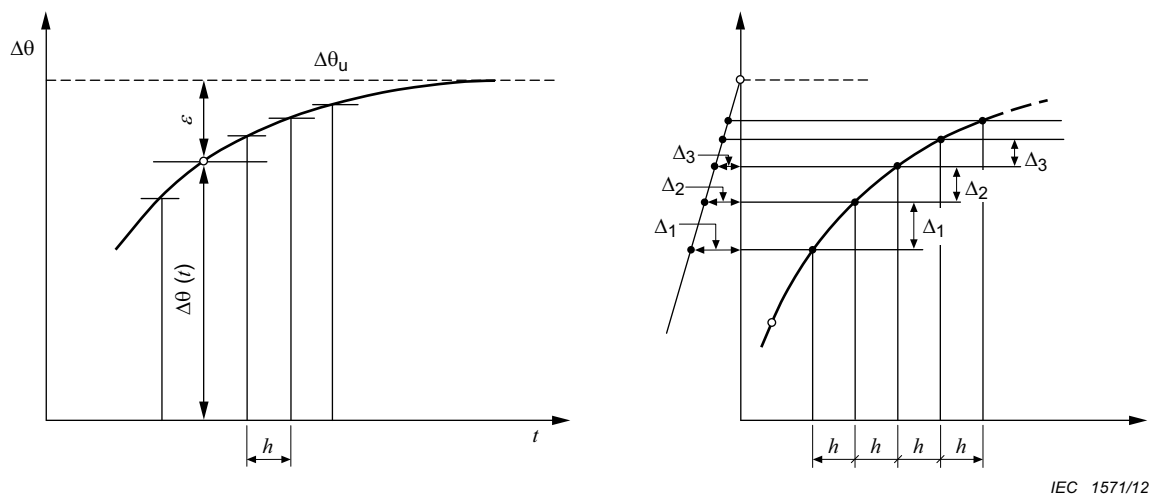


Figure 2D.1 – Extrapolation graphique de l'échauffement final

Annexe 2E
(informative)

Méthode alternative pour la mesure de l'erreur de rapport (ε)

Pour les transformateurs de courant à faible réactance de fuite, l'essai indirect suivant conduit à des résultats très proches de ceux obtenus dans l'essai direct.

Néanmoins, pour les essais individuels de série visant à la détermination de l'erreur de rapport en régime établi, l'essai direct doit toujours être réalisé, car cette méthode fournit la meilleure preuve de la «propriété de faible réactance de fuite» d'un circuit magnétique, incluant l'«homogénéité» magnétique du circuit magnétique. En revanche, la méthode alternative est appropriée aux mesures sur site et à la surveillance.

Dans ce cas, on doit noter que cette méthode ne tient jamais compte de l'influence du flux de courant au voisinage du transformateur de courant.

Pour la détermination de l'erreur de rapport, le schéma de circuit équivalent simplifié représenté à la Figure 2E.1 est utilisé:

$$\underline{I}_p \times N_p / N_s = \underline{I}_s + \underline{I}_e$$

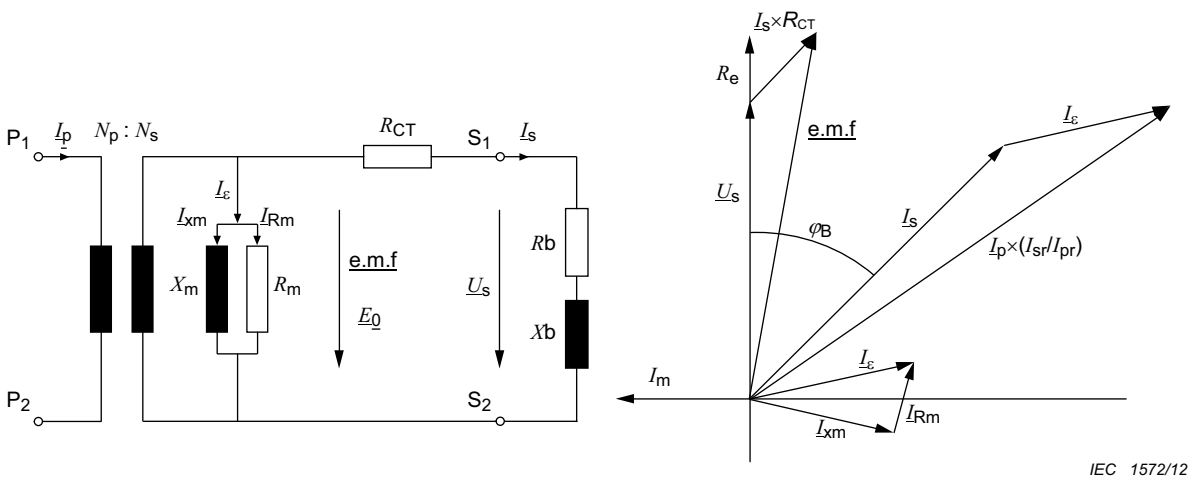


Figure 2E.1 – Circuit équivalent simplifié du transformateur de courant

Une tension pratiquement sinusoïdale est appliquée aux bornes secondaires $S_1 – S_2$ du transformateur de courant. La tension d'essai entre les bornes $\underline{U}_{s\ test}$ et le courant $\underline{I}_{s\ test}$ sont mesurés. Il convient que la tension injectée génère une force électromotrice aux bornes de l'inductance principale de même amplitude que pendant le fonctionnement avec un certain courant et la charge réelle. Il est possible de calculer la force électromotrice d'après les résultats d'essai en soustrayant la chute de tension aux bornes de la résistance de l'enroulement R_{CT} de la tension d'essai $U_{s\ test}$ entre les bornes $S_1 – S_2$. Cette soustraction doit être effectuée dans le plan complexe. Le courant mesuré $I_{s\ test}$ est égal au courant d'erreur I_ε.

L'erreur de rapport peut être exprimée par:

$$\varepsilon = \frac{\underline{I}_s - \underline{I}_p \dfrac{I_{sr}}{I_{pr}}}{\underline{I}_p \dfrac{I_{sr}}{I_{pr}}} = \frac{\underline{I}_s I_{pr}}{\underline{I}_p I_{sr}} - 1 \qquad (2E.1)$$

Avec:

$$\frac{\underline{I}_p N_p}{N_s} = \underline{I}_e + \underline{I}_s \Rightarrow \underline{I}_p = \frac{(\underline{I}_e + \underline{I}_s) N_s}{N_p} \qquad (2E.2)$$

l'erreur de rapport peut être exprimée par:

$$\varepsilon = \frac{\underline{I}_s \times N_p \times I_{pr}}{(\underline{I}_e + \underline{I}_s) \times N_s \times I_{sr}} - 1 \qquad (2E.3)$$

Pour la détermination de l'erreur de rapport pour un certain courant secondaire I_s, la procédure d'essai suivante est proposée:

- Calcul de la tension secondaire aux bornes de $S_1 - S_2$:

$$\underline{U}_s = \underline{I}_s \times (R_b + jX_b)$$

- Mesure de la résistance de l'enroulement secondaire R (valeur à la température réelle)
- Calcul de la force électromotrice correspondante

$$\underline{E}_0 = \underline{I}_s R + \underline{U}_s$$

- Injection de

$$\underline{U}_{s\,Test} = \underline{E}_0 + \underline{I}_{s\,Test} R \qquad \text{(avec } I_{s\ test} = I_s\text{)}$$

  aux bornes secondaires $S_1 - S_2$
- Mesure de la tension $U_{p\ test}$ aux bornes $P_1 - P_2$
- Calcul du rapport des nombres de spires

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{U_{p\,Test}}{|\underline{E}_0|}$$

- Calcul du courant I_p correspondant

$$\underline{I}_P = \frac{(\underline{I}_s + \underline{I}_{s\,Test}) N_s}{N_p}$$

  L'erreur de rapport peut être calculée par:

$$\varepsilon = \frac{\underline{I}_s N_p I_{pr}}{(\underline{I}_{s\,Test} + \underline{I}_s) \times I_{sr}} - 1$$

Annexe 2F
(normative)

Détermination du rapport des nombres de spires

Le rapport de transformation réel est affecté par des erreurs résultant de trois causes:

a) la différence entre l'inverse du rapport des nombres de spires et le rapport de transformation assigné;

b) le courant d'excitation du circuit magnétique (I_e);

c) les courants qui traversent les capacités parasites associées aux enroulements.

Dans la plupart des cas, il est raisonnable de supposer que pour une valeur donnée (E_s) de la force électromotrice induite dans l'enroulement secondaire, les courants d'erreur résultant des capacités parasites et de la magnétisation du circuit conservent une valeur constante indépendante de la valeur du courant primaire d'excitation. E_s peut théoriquement être maintenu à une valeur constante pour toute une gamme de courants d'excitation, pourvu que l'impédance de la boucle secondaire puisse être réglée de façon appropriée. Pour les transformateurs de courant conçus pour être du type à faible réactance de fuite, la réactance de fuite du secondaire peut être ignorée. On ne doit donc considérer que la résistance de l'enroulement secondaire. Ainsi, pour l'un ou l'autre des deux courants I'_s et I''_s, l'équation de base définissant l'exigence de l'essai est donnée par:

$$I'_S (R + R'_b) = E_S = I''_S (R + R''_b)$$

où R est la résistance réelle de l'enroulement secondaire.

Les erreurs de rapport mesurées étant désignées par ε'_c et ε''_c, l'erreur sur le rapport des nombres de spires est indiquée par ε_t, et la combinaison du courant d'excitation et des courants parasites est donnée par I_x. Les courants d'erreur respectifs sont donnés par:

$$(\varepsilon'_c - \varepsilon_t) \times k_r I'_s = I_x = (\varepsilon''_c - \varepsilon_t) \times k_r I''_s$$

d'où:

$$\varepsilon_t = \frac{\varepsilon'_c \times I'_s - \varepsilon''_c \times I''_s}{I'_s - I''_s}$$

Si $I'_S = 2I''_S$, l'erreur sur le rapport des nombres de spires est donnée par $2\,\varepsilon'_c - \varepsilon''_c$.

Un essai au courant assigné avec une charge minimale connectée au secondaire, suivi par un essai à la moitié du courant assigné avec l'augmentation convenable de la résistance de la boucle secondaire, donne habituellement des résultats satisfaisants.

_____

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

3, rue de Varembé
PO Box 131
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel: + 41 22 919 02 11
Fax: + 41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch